

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Tietoliikennejärjestelmät

2015

Cia S. Djavidan

# LÄMPÖMITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS LED-TUOTTEIDEN TESTAUSTA VARTEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Cia S. Djavidan

# LÄMPÖMITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS LED-TUOTTEIDEN TESTAUSTA VARTEN

Tässä työssä kehitettiin lämpömittausjärjestelmä LED-tuotteiden lämpötestauksia varten. Järjestelmä koostui dataloggerista ja sääkaapista. Yksi tuote testattiin sääkaapissa, se oli vakiovirtalähde. Lisäksi muutamia LED-valaisinprototyyppisiä lämpötestattiin huoneenlämmössä. Työssä tutkittiin myös LEDin lämpötilariippuvuutta ja lämmönhallintaa.

Lämpömittausjärjestelmä todettiin toimivaksi, mutta täysin ilman epäonnistumisia ei selvitty. Sääkaapin kosteutta lisäävästä tekniikasta jouduttiin luopumaan, koska se oli pysyvästi vioittunut. Lämpötilojen puolesta sääkaappi pystyi kuitenkin tarjoamaan haasteelliset olosuhteet testattaville tuotteille. Testituloksien seuraamista ja dokumentointia varten dataloggeri oli liitetty USB-väylän kautta tietokoneeseen.

Protovalaisimien mittaustulokset osoittivat, että ilman jäähdytystä tuotteet käyvät hyvin kuumina. Tätä osattiin odottaa jo ennen testejä, mutta lämpötestit ovat tuotekehityksen kannalta kuitenkin välttämättömiä. Saatuja tuloksia hyödynnetään muun muassa tuotteen jäähdytystarpeiden profiloimisessa.

## ASIASANAT:

LED, dataloggeri, sääkaappi, lämpötestaus, jäähdytys

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication systems

2015 | 46 pages

Instructor: Juha Nikkanen, Lic.Sc.(Tech), Principal Lecturer, Vitali Moilanen B.Eng

Cia S. Djavidan

# THERMAL MEASUREMENT SYSTEM DEVELOPMENT FOR LED-PRODUCTS

In this Bachelor's Thesis focus was mainly on developing a thermal measurement system for LED-products. System consisted of a datalogger and an environmental test chamber. One product was tested in environmental test chamber which was a constant current source and few LED-lighting prototypes were tested at room temperature. LED's temperature dependence and thermal management were also studied in this thesis.

Thermal measurement system was confirmed to be functional but there were complications. Moisturizing unit had to be removed after it was confirmed to be utterly useless. Despite removing from its moisturizing unit the environmental test chamber was still able to provide challenging conditions for the products to be tested. Data monitoring and documentation was also made possible by connecting datalogger and a computer together via USB.

Thermal test results of the LED-prototypes showed that without thermal management prototypes produce too much heat. This was already expected but in terms of product development thermal tests are still a necessity. Measured thermal test results are used for profiling a products need for a thermal management.

## KEYWORDS:

LED, datalogger, environmental test chamber, thermal testing, thermal management

# SISÄLTÖ

<b>LYHENTEET</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 LEDIT</b>	<b>2</b>
2.1 Valodiodin kehittyminen	2
2.2 LED-valon toiminta ja komponentin rakenne	2
2.3 LEDin lämpötilariippuvuus	4
<b>3 LÄMPÖENERGIAN SIIRTYMINEN</b>	<b>6</b>
3.1 Johtuminen	6
3.2 Konvektio	7
3.3 Säteily	7
3.4 Lämpöenergian kulkureitti ledin rakenteissa	8
3.5 Lämpöresistanssi	8
<b>4 LÄMPÖTESTAUSLAITTEISTOA</b>	<b>10</b>
4.1 Dataloggerit	10
4.2 Sääkaappi (Environmental Test Chamber)	11
<b>5 LED-LÄMMÖNHALLINTA</b>	<b>13</b>
5.1 Lämpösuunnittelun haasteet	14
5.2 Aktiivinen ja passiivinen jäähdytys	15
5.3 Jäähdytyselementin valinta	16
5.4 Ledin juotoskohdan lämpömittaus	17
<b>6 MITTAUKSISSA KÄYTETTY LAITTEISTO</b>	<b>20</b>
6.1 Lähtökohdat	20
6.2 TC-08 Datalogger	20
6.3 Termopari	21
6.4 Sääkaappi	22
6.4.1 Vanhaan sääkaappiin tutustuminen	22
6.4.2 Sääkaapin korjaustoimenpiteet ja lisäykset	23
6.4.3 DLSC-401-kompressori	25
6.4.4 Sääkaapin ohjelmointi	26

6.4.5 Esimerkkiohjelma	28
6.5 Sääkaapin validointi TC-08 dataloggerilla	29
<b>7 LÄMPÖTESTAUKSET JA TULOKSET</b>	<b>32</b>
7.1 Testit huoneenlämmössä	32
7.1.1 LED35-prototyypin lämpötestaus	33
7.1.2 LED20-prototyypin lämpötestaus	35
7.2 Vakiovirtalähdeprototyypin lämpötestaus sääkaapissa	37
<b>8 PÄÄTELMÄT</b>	<b>41</b>
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>43</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>44</b>

## KUVAT

Kuva 1. LED-valon toimintaperiaate [2]	3
Kuva 2. LED-lampun rakenne. [2]	3
Kuva 3. Liitoskohdan havainnollistaminen. [5]	5
Kuva 4. Lämpöenergian kulkureitti LED-sirusta ilmastoon. [8]	8
Kuva 5. Valotehon suhde liitoskohdan lämpötilaan. [11]	13
Kuva 6. Juottamalla kiinnitetty mittapää. [14]	18
Kuva 7. Kaksiosainen Arctic Silver, lämpöä johtava liima. [14]	19
Kuva 8. Pico Technology Datalogger TC-08.	21
Kuva 9. Sääkaappi ennen purkua ja purettuna.	22
Kuva 10. Sääkaapin sisätila.	24
Kuva 11. Mäntäkompressorin toimintaperiaate. [16]	25
Kuva 12. Sääkaapin LED-näyttöinen ohjelmointipaneeli.	27
Kuva 13. Paperille suunniteltu graafinen esitys esimerkkiohjelman vaiheista.	29
Kuva 14. Testin tulos graafisena kuvana.	30
Kuva 15. Sisävalaistukseen suunniteltu LED35-prototikku.	33
Kuva 16. LED35-prototikun lämpötestin lopputulos.	34
Kuva 17. LED20-prototyypin lämpötestin lopputulos.	36
Kuva 18. Vakiovirtalähde prototyyppi.	38
Kuva 19. Vakiovirtalähteen lämpötestin lopputulos.	39

## LYHENTEET

CMOS-RAM	Complementary Metal Oxide Semiconductor Random Access Memory, paristolla varmistettu muistipiiri
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory, uudelleenkirjoitettava ohjelmoitava muisti
FET	Field-Effect Transistor, kanavatransistori
FR-4	Flame Retardant 4, piirilevymateriaali, jossa palamisen suoja
IR	Infrared, infrapuna
LED	Light-Emitting-Diode, valoa säteilevä diodi
PC	Personal Computer, tietokone
USB	Universal Serial Bus, universaali sarjaliikenneväylä
VAC	Voltage Alternative Current, vaihtojännite

# 1 JOHDANTO

LED-teknologian kehittyminen merkkivaloista tehokkaisiin valaistusratkaisuihin tarkoittaa myös entistä suurempaa tarvetta tehokkaammalle jäähdytykselle. Monet LED-valaisimia valmistavat yritykset suunnittelevat itse tuotteidensa jäähdytyksen, lämpötestaavat niitä sekä asettavat tuotteille suosituskäyttölämpötilarajansa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää toimeksiantajayritykselle (Tepcomp Oy) oma lämpötestausjärjestelmä, jonka avulla olisi mahdollista suorittaa lämpömittauksia yrityksen LED-prototuotteille.

Työn vaatimuksena oli lämpötilamittausjärjestelmän kehittäminen, jonka avulla olisi mahdollista luoda testattaville LED-prototuotteille haastava testiympäristö. Järjestelmän pitäisi pystyä tehokkaasti jäähdyttämään ja lämmittämään, jotta sen kanssa olisi mahdollista tehdä myös lämpötilarastustestejä elektroniikkatuotteille. Tietokoneyhteys järjestelmään oli myös vaatimuksena reaaliaikaisen tilanneseurannan ja tietojen dokumentointia varten.

LED-aiheisia opinnäytetöitä löytyy aika paljon. Esimerkiksi Jaana Jahkosen diplomityö ”LED-valaisimen jäähdytys”, jota on tässä työssä käytetty yhtenä lähteenä. Tämä työ on kuitenkin poikkeuksellinen siinä mielessä, että tutkimuskohteena on lämmönhallinnan lisäksi lämpömittausjärjestelmän kehittäminen ja käyttöönotto.

Työ jakautuu kahteen osaan, joista ensimmäinen keskittyy teoriaan ja toinen käytännön valmisteluihin sekä mittauksiin. Teoriaosuudessa ei keskitytä lainkaan LED-valaisimen suunnitteluun eikä sen rakenteeseen ja sähköiseen toimintaan muuten kuin yleisellä tasolla. Työn painopiste sijoittuu lähinnä lämmönhallinnan tutkimiseen ja lämpötilamittauslaitteiston kehittämiseen.

## 2 LEDIT

### 2.1 Valodiodin kehittyminen

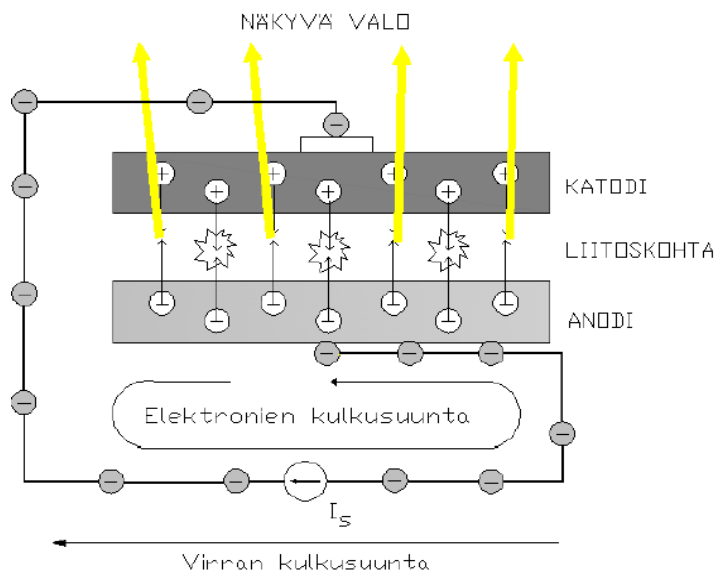
LED (light-emitting diode) eli valodiodi on puolijohdemateriaalista valmistettu elektroninen komponentti, joka säteilee valoa, kun sen läpi kulkee sähkövirta. Ensimmäinen valoa lähettävä diodi rakennettiin jo vuonna 1907, mutta LED-komponenttien varsinainen kehitys alkoi vasta 1960-luvun alkupuolella. Niitä käytettiin pitkään pääsääntöisesti vain elektronisten laitteiden merkkivaloina ja LED-näyttöissä. Yleisvalaistukseen niiden valoteho ei vielä tuolloin riittänyt. [1]

LED-tekniikan kehittyminen on mahdollistanut LED-sovellusten käytön tänä päivänä muun muassa rakennusten sisä- ja ulkovalaistuksessa, ajoneuvovalaistuksessa ja valomainoksissa. Kehityksen ansiosta LED-valaisimen valoteho on parempi kuin muissa valaisinratkaisuissa, ja niillä voidaan tulevaisuudessa korvata tarvittaessa kaikki vaihtoehtoiset valaistusteknologiat. LED-valaisinten edut perinteisiin valaistusratkaisuihin nähden ovat niiden pienen koon lisäksi, pitkä käyttöikä, värivalikoima, mekaaninen kestävyys, energiatehokkuus, turvallisuus ja pienemmät vuosittaiset ympäristöpäästöt. LEDien huonoja puolia ovat vastaavasti niiden korkeampi hinta, suunnittelun- ja tuotannon haastavuudet ja lämpötilariippuvuudet, varsinkin korkeat lämpötilat. [1]

### 2.2 LED-valon toiminta ja komponentin rakenne

LED-valon toiminta perustuu sähkövirtaan joka kuljettaa elektroneja ja elektroniaukkoja kohti p-n-liitoskohtaa ( $T_{\text{junction}}$ ), joka sijaitsee katodi- ja anodipinnien välissä (Kuva 1). Liitoskohdassa yhdistyvät elektronit sekä elektroniaukot, joiden johdosta elektroni siirtyy energiatasolla alemmas vapauttaen energiaa. Vapautuvasta energiasta osa emittoituu valoksi ja loput lämpöenergiaksi. [2]

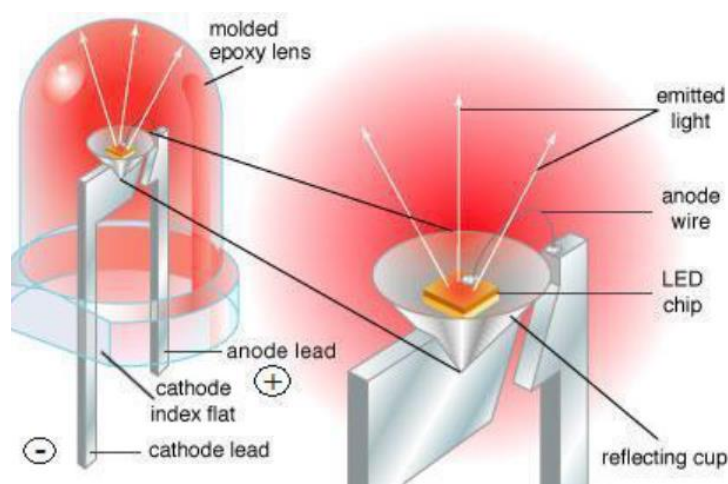




Kuva 1. LED-valon toimintaperiaate [2]

LED-valojen käyttöjännite on muutama voltia, ja virrat vaihtelevat 20 mA – 1 A. Yksittäisestä LEDistä emittoituvan valon väriin voidaan vaikuttaa jännitteellä ja lisäämällä komponentin pintaan erilaisia loisteaineita ja pinnoitteita. [2]

LEDi koostuu anodi- sekä katodipinnistä, LED-sirusta ja kotelosta (Kuva 2). Pinnit on helppo erottaa toisistaan, koska ne ovat eri pituisia. Anodipinni on pidempi kuin katodipinni. LED-lamppu toimii tasajännitteellä päästään virran kulkemaan vain yhteen suuntaan. [2]



Kuva 2. LED-lampun rakenne. [2]

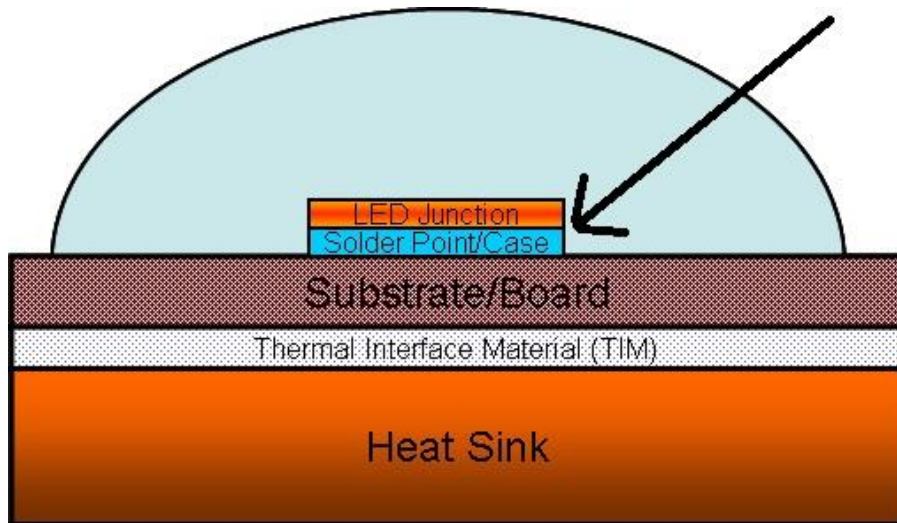
Jäähdytyslevyn koosta riippuen LED-komponenttien koot vaihtelevat muutamasta millimetristä muutamaan kymmeneen millimetriin. Nykyään yksittäinen LED-siru voi olla leveydeltään niinkin pieni kuin 0,2 mm, ja siruja voidaan sisällyttää useampia kerrallaan yhdeksi kokonaisuudeksi. Tällä tekniikalla voidaan myös muuttaa ledin värejä ja tehostaa värintoisto-ominaisuuksia. Esimerkiksi valkoista valoa saadaan aikaan hyödyntämällä punaista, vihreää ja sinistä LEDiä. [3]

LEDit voidaan ulkoisen rakenteensa perusteella jakaa kahteen eri ryhmään: pintaliitosledeihin ja perinteisiin ledeihin. Pintaliitosledeissä LED-yksikkö kiinnitetään suoraan valmiin piirilevyn pintaan, ja koska ne ovat yleensä suurempitehoisia kuin perinteiset ledit, ne suunnitellaan paremman jäähdytyksen aikaansaamiseksi. Tehokkaamman suorituskyvyn, paremman jäähdytyksen ja laadukkaamman optisen suunnittelun ansiosta pintaliitosledit alkavat olla valaisinkäytössä suositumpia kuin perinteiset ledit. Laadukas ja huolellinen panostus LED-valaisimen kokonaisvaltaiseen suunnitteluun ja tuotantoon takaavat sille pitkän käyttöiän, jopa 100 000 tuntia. Yleisvalaistuksessa päästään kuitenkin keskimäärin noin 30 000:n käyttötuntiin. [3]

### 2.3 LEDin lämpötilariippuvuus

Suurin yksittäinen ratkaisua vaativa ongelma LED-valaisimissa on ehkä niiden lämpötilariippuvuus. Aktiivisena oleva valaisin tuottaa lämpöä, joka vaikuttaa oleellisesti sen toimintaan. Junction Temperature ( $T_j$ ) vastaa LEDin liitoskohdan (Kuva 3) lämpötilaa mille valmistajat ovat antaneet tuotteesta ja sen käyttökohteesta riippuen maksimiarvon, mitä he eivät suosittele ylitettävän. Kaikissa tapauksissa on kuitenkin suositeltavaa pitää tuo lämpötila alle 120 °C. Jos laitteen generoimaa lämpöä ei johdeta valaisimen rakenteiden kautta pois, ylittyy valmistajan asettama maksimi  $T_j$  ja seurauksena on valotehon heikkeneminen ja ennen pitkää tuotteen peruuttamaton vaurioituminen. LEDien

tiedetään säteilevän vain pienen osan lämpöä pois valokeilansa kautta ja loput häviölämpöenergiasta on poistettava muita keinoja käyttäen. [4]



Kuva 3. Liitoskohdan havainnollistaminen. [5]

LED-tuotteen lämpötilariippuvuudesta puhuttaessa on huomioitava myös tuotteen ympäristölämpötila, englanninkielellä ambient temperature ( $T_a$ ). Tämä on sen alueen tai kohteen lämpötila missä tuotetta tullaan käyttämään. Valmistajat antavat myös  $T_a$ :lle raja-arvonsa, jonka ylittäminen voi johtaa laitteen vioittumiseen. Tässäkin tapauksessa valmistajien välillä on eroavaisuuksia, mutta useimmat valmistajat ilmoittavat kuitenkin ettei tuotetta saisi altistaa yli  $85^{\circ}\text{C}$ :n ympäristölämpötiloille. Testeissä on huomattu, että altistaminen yli kyseisen lämpötilan johtaa yllättäviin kuoleentumisiin, vaikka  $T_j$  pysyisikin alle valmistajan asettaman maksimirajan. Huolellinen lämpösuunnittelu ja tuotteiden käyttö niille asetettujen optimaalisten ympäristölämpötilojen sisällä on ehdoton edellytys LED-teknologian etujen hyödyntämiseen. [6]

### 3 LÄMPÖENERGIAN SIIRTYMINEN

Energiaa ei synny eikä häviä, se muuttaa muotoaan säilyttäen energiatasapainon. Sähkölaitteisiin syötetty sähköenergia saa aikaan esimerkiksi laitteen mekaanisten osien liikumisen. Valaisinteknologiassa tuo sähköenergia muuttaa muotonsa vastaavasti valoksi. Ideaalisesti toimiva laite toimisi juurikin noin suoraviivaisesti, mutta ideaalisesti toimivia laitteita ei ole. Laadukkaimmissakin laitteissa osa energiasta muuttuu häviöiksi, kuten lämmöksi.

Jos tarkasteltavan kohteen massa pysyy vakiona, energiaa siirtyy joko työn tai lämmönsiirron vaikutuksesta. Lämmönsiirrosta on kyse vain silloin, kun ajavana voimana toimii lämpötilaero. Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan, ja sen siirtymistä voidaan kuvailla muutamilla eri menetelmillä. [7]

#### 3.1 Johtuminen

Kun lämpöenergiaa siirtyy aineen sisällä, on kyse johtumisesta. Lämpö voi siirtyä myös aineesta toiseen, jos ne ovat kosketuksissa toisiinsa. Esimerkiksi, jos kuumaa ainetta sekoitetaan täysin eristämättömällä metallisella välineellä, voidaan hetken kuluttua todeta välineen lämpeneen. Lämpöenergian virtaus liikkuu siis lämpimämmästä aineesta kylmempään aineeseen. Itse virtausta voidaan kuvailla molekyylien törmäyksillä. Lämpöenergiaa sisältävät molekyylit liikkuvat kylmemmässä aineessa olevia nopeammin, ja törmättyään hitaampiin molekyyleihin, siirtyy niistä lämpöenergiaa eteenpäin, vaikuttaen lopulta koko kappaleeseen. Se, kuinka nopeasti lämpöenergia valtaa kappaleen, riippuu lämmitettävän kohteen ominaisuuksista. Esimerkitapauksessa voidaan todeta kylmemmän aineen nopea lämpeneminen, sillä metallit omaavat paljon vapaita elektroneja, jotka voivat kuljettaa lämpöenergiaa etäälle, ja näin ollen johtavat ne myös hyvin lämpöä. [7]

### 3.2 Konvektio

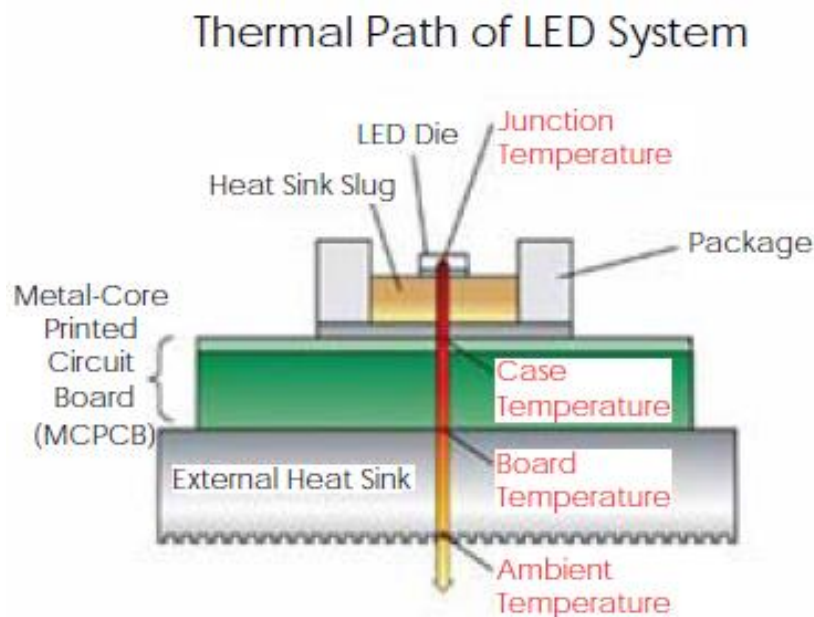
Yksi lämmönsiirtomekanismeista on konvektio. Konvektiossa yleisesti ottaen huonosti lämpöä johtavat aineet, kuten kaasut ja nesteet kuljettavat lämpöä paikasta toiseen joko vapaasti tai pakotettuna. Tämä lämmönsiirtymismalli perustuu siis kuljettumiseen. Vapaassa konvektiossa ainevirtaus tapahtuu niin, että kylmempi ja samalla tiheämpi aine painautuu alas, kun vastaavasti lämpimämpi ja tiheydeltään pienempi aine nousee tiheämmän aineen yläpuolelle. Ilman tiheyseroja ei tapahdu vapaata konvektiota. Pakotetussa konvektiossa ainevirtoja luodaan koneellisesti. Esimerkiksi rakennusten keskuslämmityksessä käytetään vesipumppua, joka tehostaa vedenkiertoa. Huone kuitenkin kokonaisuudessaan lämpiää vapaan konvektion seurauksena. [7]

### 3.3 Säteily

Lämpöä voi siirtyä myös säteilemällä ja tämä vaihtoehto eroaa muista lämmönsiirtymismekanismeista siinä mielessä, että se ei tarvitse väliainetta siirtyäkseen. Todisteena tästä on auringon tuottama lämpöenergia, joka kulkee ensin avaruuden tyhjiön läpi ennen kuin se saapuu maapallolle. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka osuessaan kohteeseen voi joko heijastua, absorboitua tai läpäistä sen. Kaikkien kappaleiden tiedetään lähettävän eli emittoivan lämpösäteilyä, mutta myös imevän eli absorboivan sitä itseensä. Jos kappale vain emittoisi kaiken energiansa pois, laskisi sen lämpötila lopulta absoluuttiseen nollapisteeseen. Lämpösäteilyyn vaikuttavat kappaleen pinnan ominaisuudet ja materiaali. Tummat ja karkeat pinnat ovat yleisesti ottaen parempia emittoimaan ja absorboimaan lämpösäteilyä kuin vaaleat, sileät ja kiiltävät pinnat. [7]

### 3.4 Lämpöenergian kulkureitti ledin rakenteissa

Lämpöenergian siirtyminen korkeammasta matalampaan on luonnollinen prosessi ja kun on kyse LEDissä syntyvän lämmön siirtämisestä, pyritään lämpösuunnittelussa hyödyntämään kyseistä ilmiötä mahdollisimman hyvin. Kuvassa 4 on esimerkki kuinka lämpöenergia kulkee LEDistä ympäröivään ilmastoon.



Kuva 4. Lämpöenergian kulkureitti LED-sirusta ilmastoon. [8]

Lämpö siirtyy väliainerajapintojen läpi materiaalista toiseen ja kun se on saavuttanut metallisen rungon, siirtyy se lopulta tuotteesta ilmastoon. LED-valaisimen kykyä siirtää lämpöä itsestään pois määrittää tuotteen kokonaislämpöresistanssi. [8]

### 3.5 Lämpöresistanssi

Lämmönsiirtymiseen vaikuttavat useat eri tekijät, mutta olennaista elektroniikkalaitteiden jäähdytyksen kannalta on taata niille riittävä lämmönsiirto kaikissa tilanteissa, myös silloin kun niitä käytetään jatkuvasti maksimiteholla.

Lämpöresistanssi kuvaa väliaineen kykyä vastustaa siitä läpi kulkevaa lämpöä. Väliaineen lämpöresistanssin ja lämpötilaeron ollessa tiedossa, on siirrettävä häviöteho helppo laskea yhtälöstä [7]:

$$Q' = \frac{\Delta T}{R}$$

jossa,

$Q'$  = lämmönsiirtoteho (W)

$\Delta T$  = lämpötilaero (K)

$R$  = lämpöresistanssi (K/W)

Yhtälön perusteella voidaan todeta, että mitä pienempi on laitteen kokonaislämpöresistanssi sitä tehokkaammin lämmöksi muuttunut häviöenergia saadaan poistettua siitä. Kokonaislämpöresistanssia tarkasteltaessa ei riitä pelkästään väliainekerrosten lämpöresistanssien huomioiminen, koska niiden keskinäisissä liitoksissa esiintyy epätasaisuuksia, jotka taas muodostavat eristäviä ilmarakoja aiheuttaen kontaktiresistanssia. Kontaktiresistanssin suuruus riippuu useasta eri tekijästä ja se on laskuissa huomioitava aina kun sen osuus on merkittävä. Kontaktiresistanssin osuutta systeemin kokonaislämpöresistanssista voidaan pienentää lisäämällä väliainerajapintojen väliin hyvin lämpöä johtavia nesteitä, kaasuja, faasimuunnosmateriaaleja tai metallikalvoja. [7]

## 4 LÄMPÖTESTAUSLAITTEISTOA

### 4.1 Dataloggerit

Dataloggerit ovat elektronisia tiedon taltiointilaitteita joilla on mahdollista tehdä tarpeen mukaan erilaisia mittauksia kuten lämpö-, kosteus-, virta-, jännite- ja painemittauksia. Mittausvaihtoehdot eivät rajoitu mainittuihin vaihtoehtoihin vaan valikoima on melko laaja. Kehittyneemmät laitteet kykenevät luonnollisesti monipuolisimpiin ja tarkempiin mittauksiin. Laite ottaa ja taltioi näytteitä sille määrätyn ajan ja näytteidenotto aikaväli asetetaan käyttäjän toimesta ennen kuin varsinainen mittausprosessi alkaa.

Tyypillinen dataloggeri on käytännöllisen kokoinen ja jännitelähteenään se käyttää paristoja. Laite toimii sisäisellä mikroprosessorilla ja siinä on tallennusyksikkö tiedon tallentamista varten. Dataloggeri toimii joko itsenäisesti omalla näytöllään tai sen voi liittää USB-väylän kautta tietokoneeseen. Valmistaja lähettää laitteen mukana dataloggerimalliin sopivan ohjelman, jonka avulla käyttäjä pystyy halutessaan määrittämään mittauksiensa kokonaiskestot ja kuinka usein näytteitä otetaan testin aikana. Ohjelma mahdollistaa myös reaaliaikaisen tuloksien seurannan tietokoneen näytöltä. Usein kyseisen ohjelman voi myös ladata valmistajan omilta verkkosivuilta. Näytteitä otetaan antureilla, jotka liitetään mittauslaitteen ja mitattavan kohteen väliin. Dataloggermallista riippuen laite tukee joko yhtä tai useampaa anturia.

Markkinoilta on mahdollista löytää eri hintaisia, kokoisia ja käyttömahdollisuuksiltaan hieman poikkeavia dataloggereita. Toimintaperiaate on kaikilla kuitenkin sama. Laitteet ovat suunniteltu kestäväksi hyvin kylmyyttä ja lämpöä, joten luotettavien mittauksien tekeminen onnistuu vähän haastavammissakin ympäristöolosuhteissa. Mallista riippuen dataloggerit soveltuvat hyvin muun muassa kylmäketjun katkeamattomuuden seurantaan, paikallisiin mittauksiin niin sisä- kuin ulkotiloissa ja vedenalaisiin mittauksiin.



## 4.2 Sääkaappi (Environmental Test Chamber)

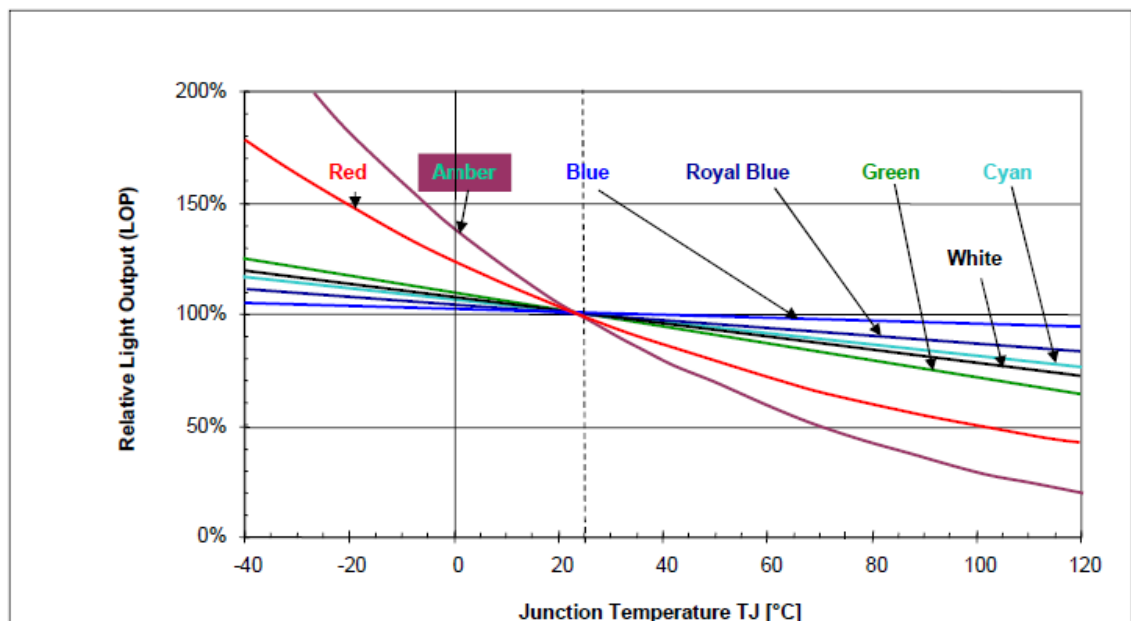
Asiakkaalle uutta tuotetta suunniteltaessa on lähtökohtana aina kyseisen asiakkaan tuotekohtaisten vaatimuksien ja toiveiden huomioiminen. Ennen varsinaista suunnittelua ja tuotantoa on hyvä tietää mihin käyttötarkoitukseen ja minkälaisissa olosuhteissa tuotteita tullaan hyödyntämään. Uudet tuotteet suunnitellaan siis asiakkaan lähtötietojen perusteella. Elektroniikkatuotteiden, kuten LED-valaisinten kohdalla elektroniikan suunnittelun, teoreettisten laskentojen, komponenttien valintojen ja piirilevynsuunnittelun jälkeen siirrytään protosarjan tuotantoon. Protovalaisimet testataan asianmukaisia menetelmiä käyttäen ja kun testitulokset vastaavat suunnitelmia, voidaan aloittaa myyntiin tarkoitettujen tuotteiden sarjatuotanto. Huoneenlämpöön tarkoitettujen tuotteiden testaukset ja mittaukset on suhteellisen helppo suorittaa, kun taas ulkoilmaan tarkoitettujen testaamiseen vaaditaan enemmän panostusta. Yksi vartenotettava vaihtoehto on hankkia environmental test chamber, joka on vapaasti suomennettuna sääkaappi.

Joidenkin yritysten kohdalla on kannattavaa harkita omaan sääkaappiin investointia. Toinen vaihtoehto on prototuotteiden testaaminen laboratorio-olosuhteissa, mutta tämä voi tuottaa enemmän haasteita niin ajankäytön kuin sääolosuhteiden lavastamisenkin kanssa. Ulkoilmavalaisimille on testattava muun muassa vaihtelevan ilmastonlämpötilan ja kosteuden varalta, mutta esimerkiksi saunatiloihin tarkoitettu valaisin joutuu hyvinkin kuumissa ja kosteissa olosuhteissa toimimaan, ja sen toimivuus ja luotettavuus on ennen asiakkaalle myymistä tavalla tai toisella testattava. Sääkaapit mahdollistavat sääolosuhdetestaukset juuri silloin kuin yritys sitä tarvitsee, mutta ennen sääkaapin hankintaa on viisasta kartoittaa mitä ominaisuuksia siihen halutaan ja tehdä ostopäätös vasta sen jälkeen. Sääkaappeja löytyy moneen tarkoitukseen, kuten lämpö-, kosteus- ja värinätestaukseen, ja eri kokoja on tarjolla pienistä pöytämalleista suuriin ajoneuvon mahduttaviin malleihin. Jos tarjolla olevista sääkaappivaihtoehdoista ei yksikään sovellu kaappia hankkivan yrityksen

käyttötarkoituksiin, on useiden valmistajien kanssa tarvittaessa mahdollista neuvotella sopivan sääkaapin erikseen räätälöinnistä. [10]

## 5 LED-LÄMMÖNHALLINTA

LEDit eivät ole suorituskyvyltään sataprosenttisia, vaan ne tuottavat myös häviöitä, kuten lämpöä. Vain hyvin pieni osa lämmöstä poistuu tuotteesta LEDin valokeilan kautta IR-säteilynä. Suurin osa lämpöhäviöistä joudutaan poistamaan johtumalla, käyttäen apuna erilaisia jäähdytysjärjestelmiä. Jäähdytysjärjestelmien tehtävänä on estää tuotteen ylikuumeneminen ja siitä johtuva ennenaikainen rikkoutuminen. Jäähdytysjärjestelmien avulla pyritään pitämään etenkin halutut kohdat, kuten LEDin liitoskohta ( $T_j$ ) alle kriittisen lämpötilan. Kuvasta 5 nähdään kuinka korkeat liitoskohdan lämpötilat vaikuttavat suoraan valotehoon.



Kuva 5. Valotehon suhde liitoskohdan lämpötilaan. [11]

Lämpösuunnittelussa on huomioitava useita eri tekijöitä kuten ympäristön lämpötila, tuotteen käytössä generoitu lämpö, jäähdytysjärjestelmään tarkoitettu materiaali ja sen lämpöresistanssi. LED-valaisinten luvattu pitkä ikä, valoteho, luotettavuus ja energiatehokkuus ovat kaikki siis riippuvaisia laadukkaasta lämpösuunnittelusta. [11]

## 5.1 Lämpösuunnittelun haasteet

Vaikka LED-valaisimet ovat vasta pikku hiljaa tekemässä vallankumousta valaisinteknologiassa, vaaditaan niiltä nyt jo paljon. Valaisimen tulisi olla kooltaan pieni ja sen tulisi vakuuttaa itsensä ostajalleen myös ulkomuotonsa perusteella. Käytettiin sitä sitten piilossa varastovalaisimena tai näkyvällä paikalla yleisvalaistuksena niin ensimmäinen asia mikä kiinnittää kuluttajan huomion tuotetta ostaessa on sen ulkonäkö. Pelkästään fyysiset olemukset eivät tietenkään riitä vaan niiden tulisi olla myös kustannustehokkaita, luotettavia ja pitkäikäisiä. Jos kyseessä on esimerkiksi hieman tehokkaampi aktiivista jäähdytystä hyödyntävä valaisinmalli vaaditaan siltä edellämainittujen lisäksi myös hiljaisuutta toimiessaan. Jos kehitys jatkuu nykyisellään niin tehovaatimukset kasvavat entisestään valaisimien fyysisten kokojen pysyessä kuitenkin edelleen pieninä. Mitä tehokkaampi valaisin on, sitä enemmän se tulee myös tuottamaan lämpöä, joka on pystyttävä poistamaan siitä.

Toisin kuin perinteiset hehkulamput, ledit eivät riittävästi haihduta lämpöä pois säteilemällä, vaan lämpö siirtyy niistä johtumalla, kunnes se lopulta vapautuu ympäristöön vapaalla tai pakotetulla konvektiolla. Johtumiseen käytetään sähköeristettyjä, ohuita lämpöä johtavia metallilevyjä, yleensä alumiinia ja kuparia. Suurempi pinta-ala metallilevyille helpottaisi prosessia tuntuvasti, mutta se ei ole niin yksinkertaista sillä kuluttajat suosivat pieniä valaisinmalleja. Tilaa on siis rajallisesti. Suunnitellessaan johtumisreittiä lämmölle, joutuu LED-valaisinvalmistaja miettimään myös käyttämänsä materiaalin kokonaislämpöresistanssia. LED-sirun liittamisestä lähtien on oltava huolellinen kuinka komponentit kiinnittyvät toisiinsa. Äärimmäisestä huolellisuudesta huolimatta koskaan ei päästä ideaaliseen lopputulokseen, vaan kontaktiresistanssia tulee aina esiintymään väliainerajapinnoissa. Rajapintojen toisiinsa liittämistä voidaan kuitenkin helpottaa tarpeen tullen käyttämällä esimerkiksi lämpöä johtavaa liimaa, muovia tai teippiä.

Jotkut LEDit joutuvat suurien lämpötilojen ja lämpötilaerojen armoille. Lämpötilat saattavat vaihdella myös melko usein ja tämä lisää entisestään lämpösuunnittelun haasteita. Viileässä ja kylmässä LED-sovellukset pärjäävät varsin hyvin, mutta erityisen korkeat ympäristön lämpötilat haittaavat oleellisesti LEDin toimintaa. Korkeita lämpötiloja vastaan voidaan soveltaa aktiivista jäähdytystä. Aktiivista jäähdytystä voidaan myös hyödyntää sellaisissa tilanteissa joissa luonnollista konvektiota ei ehdi tapahtua riittävän nopeasti suhteessa lämmöntuottoon esimerkiksi valaisimissa joissa on useampia LED-siruja hyvin tiheään tuottamassa lämpöä.

Taloudelliseen kannattavuuteen pyrkiminen lisää myös osaltaan lämpösuunnitteluun haasteensa. Useammalla LED-sirulla saavutetaan tietty valoteho, mutta täytyy pitää mielessä, että ledit ovat myös komponenteista kalleimpia. Lisäämällä yhden LED-sirun virtaa saadaan siitä enemmän valotehoa ja näin useamman LED-sirun valaisin voidaan korvata yhdellä sirulla. Tämä vaatii lisäbudjettia jäähdytyksessä pienentäen kuitenkin samalla kokonaisbudjettia. [12]

## 5.2 Aktiivinen ja passiivinen jäähdytys

Puolijohdevalaisimen tai yleisesti ottaen elektroniikkalaitteen tehon suuretessa sen lämmöntuottokin kasvaa. Jäähdytyslementeillä pyritään tuo lämpö ohjaamaan pois laitteen kriittisistä osista. Se millä perusteella sopiva jäähdytyslementti valitaan riippuu käytännössä jäähdytettävän laitteen muotoilusta, tehonkulutuksesta, komponenttien sijoittelusta, fyysisestä koosta ja budjetista. Pienitehoisiin LED-sovelluksiin, kuten merkkivaloihin, riittää pääsääntöisesti passiiviset jäähdytyslementit, mutta jos jäähdytettävänä on esimerkiksi muotoilultaan haastava ja tehonkulutukseltaan korkeampi ledi voi aktiivinen jäähdytyslementti olla parempi vaihtoehto. [13]

Passiivisiksi jäähdytyslementeiksi voidaan kutsua muun muassa hyvin lämpöäjohtavia metallilevyjä tai jäähdytysilejä, joiden tehtävänä on siirtää

lämpöä haluttuun suuntaan luonnollisella tavalla eli johtumalla. Yhteistä kaikilla passiivisilla jäähdytysselementeillä on se, että niissä johtumalla siirretty lämpö tarvitsee vielä vapaata konvektiota vapautuakseen ympäristöön. Aktiiviseksi jäähdytysselementiksi voidaan kutsua vastaavasti jäähdytyspiiliä, johon on kiinnitetty tuuletin tai jokin muu ilmaa haluttuun suuntaan pakottamalla ohjaava systeemi. Jälkimmäisessä tapauksessa on kyse johtumisen ja pakotetun konvektion yhteisvaikutuksesta. Lämpö siirtyy jäähdytyspiileen kannasta siilen eviin vapautuen sitä kautta ympäröivään ilmaan, ja tätä toimintaa tehostetaan tuulettimella. [8, 13]

Aktiiviseen jäähdytykseen tarvetta ei aina ole, mutta sitä kannattaa mahdollisuuksien mukaan harkita. Se tuo mukanaan omat haasteensa, mutta myös paljon etuja passiiviseen jäähdytykseen nähden. Jos tavoitteena on pienikokoinen ja tehokas valaisinratkaisu, voi passiivinen jäähdytys olla huonompi valinta. Enemmän tehoa tarkoittaa enemmän tuotettua lämpöä, eikä passiivinen menetelmä välttämättä pysty samassa suhteessa haihduttamaan sitä. Passiiviset ratkaisut vaativat enemmän pinta-alaa ja materiaalia, joka tekee niistä kookkaampia ja painavampia. Enemmän materiaalia tarkoittaa puolestaan suurempaa kokonaislämpöresistanssia. Aktiivisella vaihtoehdolla voidaan siis saavuttaa sama tai parempi lämmönpoistokyky kuin passiivisella ilman, että tingitään valon tehossa tai laadussa. Samalla saadaan valmistettua pienempiä ja muotoiltuja tuotteita kauppojen hyllyille. [8]

### 5.3 Jäähdytysselementin valinta

Ennen kuin tuotteelle valitaan tai suunnitellaan varsinainen jäähdytysselementti, olisi hyvä olla lähtökohtaisesti muutama asia tiedossa, kuten ylä- ja alarajat jäähdytysteholle, ympäristöolosuhteille, geometrisille mitoille, massalle, luotettavuus- ja elinikävaatimuksille sekä hinnoittelulle. Kriteerit, joiden perusteella valinta tehdään, vaikuttavat myös oleellisesti siihen, tuleeko jäähdytyksestä aktiivinen vai passiivinen. Passiivisessa jäähdytyksessä tapahtuvan luonnollisen konvektion virtausnopeus on alhainen, ja tästä syystä

jäähdytyslementin pinta-alan ja sen muiden osien merkitys on suurempi. Jos elementin suunnittelussa rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi koko ja paino, voidaan silloin joutua materiaalin valinnassa tinkimään. Jäähdytyslementin pinta-alaa joudutaan pienentämään sekä paremmin lämpöä johtavan kuparin sijaan joudutaan käyttämään kevyempää alumiinia. Tämä ratkaisu ei välttämättä ole paras mahdollinen jäähdytystä ajatellen ellei sitten konvektion virtausnopeutta voida lisätä pakottamalla eli siirtymällä aktiiviseen jäähdytykseen.

Muutamia poikkeuksia lukuunottamatta jäähdytyslementin valintaprosessi luonnollisen ja pakotetun konvektion välillä on samanlainen. Valintaa tehtäessä tärkeitä parametreja, joihin tulisi kiinnittää huomiota, ovat kannan pinta-ala ja paksuus, evien mitat ja välimatka, materiaali josta elementti on tehty sekä pintakäsittely. Viimeisen päälle ei kaikkia parametreja kannata kuitenkaan optimoida, vaan tärkeintä on panostaa olennaiseen. Esimerkiksi luonnollisessa konvektiossa, jossa jäähdytyslementin pinta-alalla on suuri merkitys, kannattaa panostaa elementin kannan pinta-alan maksimoimiseen käytettävissä olevaan tilaan nähden. Pakotetussa konvektiossa tärkeitä seikkoja ovat niin ikään virtaushäviöiden minimoiminen ja niiden suuntaaminen mahdollisimman tasaisesti jäähdytettävälle pinnoille. Aktiivisessa jäähdytyksessä korostuu myös jäähdytyslementin mekaanisten osien toimivuus ja luotettavuus. [7]

#### 5.4 Ledin juotoskohdan lämpömittaus

Tässä luvussa käsitellään LEDin juotoskohdan ( $T_{case}$ ) lämpömittausta. Tuotteen LED-liitoskohtan ( $T_j$ ) laskemiseen tarvitaan kokonaislämpöresistanssin ja tehon lisäksi vielä LEDin juotoskohdan lämpötilan arvot. Kun mittaus on suoritettu, voidaan saatu tulos sijoittaa kaavaan:

$$T_j = T_c + \theta_{th} P_{total}$$

missä,

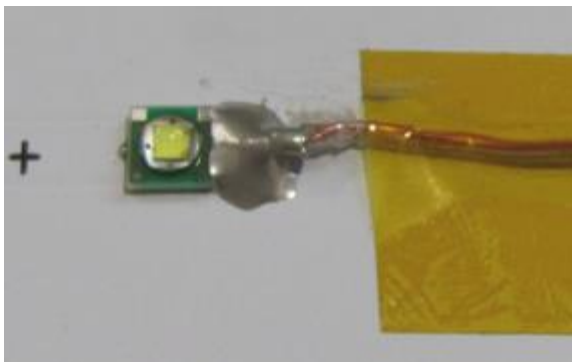
$T_j$  on liitoskohdan lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_c$  on juotoskohdan lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Theta_{th}$  on ledin lämpöresistanssi ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

$P_{total}$  on ledin kokonaisteho (W)

Varsinaisen mittauksen voi tehdä esimerkiksi käyttämällä luotettavaksi todettua dataloggeria ja tarkoitukseen sopivia mittapäitä. Tulosseurantaa helpottaa, jos dataloggeri on PC-yhteensopiva. Mittapäää tulisi kiinnittää niin, että se on suorassa kosketuksessa mitattavan kohteen kanssa. Tässä tapauksessa mahdollisimman lähelle lämpöä johtavaan alustaan, johon LED-siru on kiinnitetty. Mittapään kiinnitystapoja on useampia, mutta käytetyimmät tavat ovat juotos- ja lämpöliimakiinnitys. Kuvan 6 anturi on siististi ja onnistuneesti kiinnitetty juottamalla alustaan. [14]



Kuva 6. Juottamalla kiinnitetty mittapää. [14]

Oikein onnistuneen juotoskiinnityksen hyviä puolia on vahva ja kestävä kiinnitys mittapään ja alustan välillä. Lisäksi luotettavan lämmönsiirtymisen johdosta mittaustulokset ovat tarkkoja. Vastaavasti huonolla tekniikalla suoritettu juotos voi vaikuttaa negatiivisesti tuloksiin, koska silloin mittapäää ei välttämättä juotu kunnolla kiinni alustaan ja tulokset jäävät epätarkoiksi. Juotoskiinnityksen onnistuminen vaatii siis huolellisuutta ja kokemusta. Kaikkiin alustapintoihin ei tämä vaihtoehto kuitenkaan sovellu. Huonoja pintoja ovat esimerkiksi muovi ja lasikuitu epoksilaminaatit. [14]



Toinen yleisesti käytetty kiinnitystapa on hyödyntämällä lämpöä johtavaa liimaa. Tämä vaihtoehto on helpompi suorittaa, jos vertailukohteenä on juottamalla kiinnittäminen. Ongelmia tässä vaihtoehdossa tuottaa lähinnä mittapään poistaminen kohteesta tuloksien saamisen jälkeen, sillä mitään helppoa keinoa liimaan poistamiseen ei ole. Lisäksi mittapään liimaaminen kohteeseen voi tuottaa hieman haasteita, koska liiman kuivuminen vaatii oman aikansa. Mittapään voi kuitenkin kiinnittää alustavasti käyttäen pientä palaa lämpöäjohtavaa teippiä. Kuvan 7 lämpöä johtava liima on kaksiosainen.



Kuva 7. Kaksiosainen Arctic Silver, lämpöä johtava liima. [14]

Kaksiosainen liima yhdistetään siten, että molempia sekoitetaan huolellisesti keskenään suhteessa 1:1. Kaikkea ei kannata kerrallaan sekoittaa jos ei siihen ole tarvetta, koska sekoituksen jälkeen yhdiste kovettuu huoneenlämmössä noin kymmenen minuutin sisällä ja tämän jälkeen se on käyttökelvoton. [14]

LEDin juotoskohdan lämpömittaus voidaan aloittaa, kun mittapään kiinnitys on suoritettu ja pysyvyys tarkistettu. Mittaus on valmis vasta silloin, kun lämpötila kohteessa on stabiloitunut. Kohteen voidaan olettaa stabiloituneen, kun sen lämpötila ei enää muutu merkittävästi muutamaan minuuttiin. Jos mittauksissa käytetään dataloggeria, olisi suositeltavaa laittaa asetukset niin, että se ottaa automaattisesti näytteitä tietyin väliajoin ja näyttää tulokset reaaliajassa tietokoneen näytöltä. Juotospisteen lämpömittausta ei kannata suorittaa ympäristössä missä lämpötila vaihtelee, sillä se vaikuttaa mittaustuloksiin. [14]

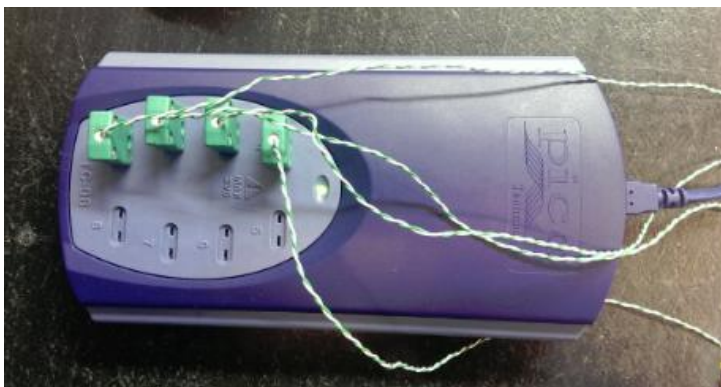
## 6 MITTAUKSISSA KÄYTETTY LAITTEISTO

### 6.1 Lähtökohdat

Toimeksiantajan kanssa pidettiin ennen varsinaisen työn aloittamista keskustelu työn käytännön osuuden sisällöstä. Keskustelun aiheina olivat muun muassa testauslaitteiston hankinta, yrityksessä valmiiksi olevien laitteiden toimivuuden testaaminen ja mahdolliset korjaustoimenpiteet sekä LED-protujen lämpötestaus. Yritys hankki kaikki tarvittavat välineet ja laitteiston ellei niitä löytynyt valmiina. Sääkaappiin liittyen vaihtoehtoihin kuului joko kokonaan uuden laitteen rakennus tai sitten varastossa olevan vanhan sääkaapin testaus ja mahdollinen entisöinti. Ajan puitteissa järkevintä oli tarkistaa, missä kunnossa varastossa oleva laite on. Jos se olisi todettu käyttökelvottomaksi, vasta sen jälkeen olisi viisainta punnita muita vaihtoehtoja. Mittauslaitteistoa toimeksiantajalla ei vielä ollut, mutta heti kun kaikki mittauslaitteelta vaaditut kriteerit sekä siihen varattu budjetti oli selvitetty, oli aika etsiä sopiva laite valmistajien verkkosivuilta.

### 6.2 TC-08 Datalogger

Lämpömittauksien suorittamista varten toimeksiantajayrityksen kanssa oli sovittu, että kartoitetaan eri yritysten dataloggerivalikoimaa ja tilaukseen laitetaan heidän käyttötarkoituksiinsa parhaiten sopiva malli, joka ei kuitenkaan ylitä 300 €:a. Dataloggerissa tulisi olla monikanavainen liitäntä, jotta useamman testipisteen yhtäaikaista mittaamista olisi mahdollista. Lähtökohtana oli sellainen malli, joka on USB-väylän kautta mahdollista liittää pöytäkoneeseen ja on mahdollisimman tarkka mitattavassa lämpöä ja kosteutta. Kuvassa 8 on toimeksiantajayrityksen testeihin valittu Pico Technologyn datalogger, jonka malli on TC-08.



Kuva 8. Pico Technology Datalogger TC-08.

Lämpötestauksiin valittu datalogger TC-08 on 8-kanavainen, eli siihen on mahdollista liittää 8 mittapäätä, joiden avulla voidaan tehdä yhtä monta mittausta samanaikaisesti. Laite tukee USB-liitainta, minkä ansiosta se toimii lähes kaikkien USB-yhteensopivien tietokoneiden kanssa, kunhan kaikki muut vaatimukset täyttyvät. Malli ei esimerkiksi toimi kaikissa Windowsin käyttöjärjestelmissä. Laitteen mukana tuli CD-levy, joka sisälsi ohjelmiston ja ajurit. Jos levy olisi syystä tai toisesta vioittunut ennen asennusta, se ei olisi aiheuttanut suurempia ongelmia, sillä kaikki tarvitta olisi ollut ladattavissa myös valmistajan omilta verkkosivuilta. [15]

### 6.3 Termopari

Termopari on lämpötila-anturi, jonka toiminta perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään lämpötilasta riippuvaan jännitteeseen. Antureita valmistetaan monista metallipareista, ja tämän työn mittauksiin käytetty K-tyyppin termoparin muodostavat chromel- ja alamel-seokset. Chromel muodostuu nikkelistä ja kromista, ja alamel muodostuu vastaavasti nikkelistä ja alumiinista. Mittaus tapahtuu niin, että anturin mittaava pää asetetaan tutkittavaan lämpötilaan ja toinen pää mittariin. Termoparin lämpötilaerojen noustessa niiden välinen jännite kasvaa. Mitattava lämpötila saadaan määritettyä termoparin välille muodostuneen jännite-eron avulla, kun tiedetään kyseisen metalliparin herkkyys, eli jännitteen riippuvuus lämpötilasta. Datalogger TC-08:n kanssa yhteensopivia termopareja ovat K-tyyppin lisäksi B-, E-, J-, N-, R-, S- ja T-tyyppin

termoparit. K-typin termopari on yleisin ja halvin termoparimalli, joka sopii käytettäväksi TC-08:n kanssa, ja sen toimintalämpötila on  $-270\text{ °C}$ ... $370\text{ °C}$ . [15]

## 6.4 Sääkaappi

### 6.4.1 Vanhaan sääkaappiin tutustuminen

Uuden sääkaapin rakentamista tai ostamista ei ollut kannattavaa harkita, sillä aikaa oli rajallisesti eikä budjettikaan olisi riittänyt sellaiselle hankinnalle. Sen sijaan keskityttiin vanhaan sääkaappiin, joka oli jäänyt jostakin projektista käyttämättömäksi yrityksen varastoon. Toimeksiantajan mukaan kyseinen kaappi oli ollut heillä ainakin 10 vuotta, ja tästä syystä laite oli vähintäänkin tarkastettava perusteellisesti ja mahdollisesti myös huollettava. Kuvassa 9 näkyy sääkaappi ennen ja jälkeen purkamisen.



Kuva 9. Sääkaappi ennen purkua ja purettuna.

Ensivaikutelma kaapista oli ihan hyvä, koska hieman vääntyneitä peltiosia lukuunottamatta kaappi vaikutti siistiltä. Kaapin päävirtakytkimen sijainti oli melko korkealla vasemmassa yläkulmassa, ja sen vasemmalta sivulla oli myös sääkaapin ohjauspaneeli. Laitteen sisällä oli peltilevy, jonka taakse oli aseteltu lämpövastukset, sekä ylhäällä kaksi tuuletinta. Yksi lämpötila-anturi oli myös kiinnitettynä vasempaan laitaan sääkaapin sisälle suurin piirtein tuulettimien tasolle. Kaapin sisätila oli joitakin paikallisia ruostumia lukuunottamatta muuten hyvässä kunnossa. Kaapin päältä oli poistettava kaikki vääntyneet peltiset osat myöhempää suoristusta varten. Niiden alle suojiin oli asennettu myös laitteen sähkötekniset liitännät, kosteusyksikkö sekä jäähdytyksestä vastaava puolihermeettinen mäntäkompressori. Vanhan sääkaapin entisöintiä ajatellen suurimmaksi yksittäiseksi ongelmaksi muodostui kosteusyksikön käyttöönotto. Kosteudesta vastaava osa kaapista oli mennyt käyttökelvottomaan kuntoon, ja projektia oli jatkettava ilman sitä.

#### 6.4.2 Sääkaapin korjaustoimenpiteet ja lisäykset

Ihan ensimmäiseksi sääkaappi oli siistittävä sisältä mahdollisimman hyvin ja suurimmat ruosteet hiottava pois. Kaikki johdot kaapin säätöyksiköstä ja muualta oli tarkastettava siltä varalta, että ne olivat liitetty oikein. Vikaantuneet tai selkeästi huonokuntoiset johdot oli vaihdettava uusiin ja ehjiin johtoihin. Kompressori, kosteusyksikkö, lämpövastus sekä muut kaappiin liittyvät osat vaativat huolellisen tarkastuksen vikaantumisen varalta. Kosteusyksikköä lukuunottamatta kaikki osat vaikuttivat olevan vielä toimintakunnossa, ja projektia oli jatkettava ilman sitä. Kaikki irroitettavat peltiset kappaleet, jotka olivat vääntyneet, suoristettiin ja asetettiin takaisin paikoilleen. Tässä vaiheessa sääkaappi oli käynyt läpi tarvittavat korjaustoimenpiteet.

Remonttivaiheen jälkeen laite olisi ollut periaatteessa valmis käyttöönottoa varten, mutta sisäpuolelle oli vielä rakennettava jonkinlaiset tasot, joiden päälle olisi mahdollista asettaa testattavat tuotteet. Lisäksi dataloggerin mittapää olisi saatava sisälle, koska sääkaapin oma mittapää ottaa lämpötilalukemia vain

kaapin sisätilasta eli testattavien tuotteiden ympäristöstä. Kuvassa 10 punaisella ympyröityyn kohtaan porattu reikä mahdollisti useamman mittapään läpiviennin.



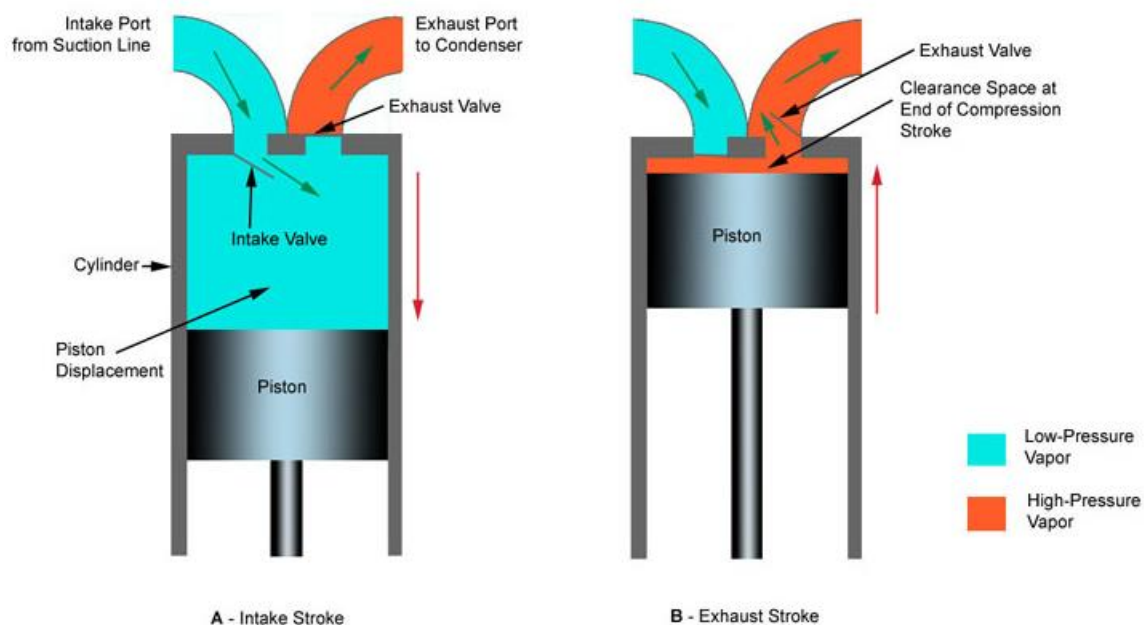
Kuva 10. Sääkaapin sisätila.

Sääkaappiin poratun reiän terävät reunat oli kaapin sisäpuolelta päällystettävä kestävällä muovilla. Tällä tavalla suojataan sääkaapin kanssa työskenteleviä viilloilta, jotka kohdistuvat käsiin, ja samalla reiän kautta menevät johdot säästyvät myös rikkoontumisilta. Porattu reikä oli myös peitettävä jotenkin tai muuten lämpö karkaisi testejä tehtäessä sitä kautta ulos. Tämän ongelman ratkaisuun oli käytössä noin puolen sentin paksuinen joustava muovimaton palanen, jonka keskelle tehtiin pysty- ja vaakasuorat viillot, jotta siihen syntyisi läpimentävä aukko. Muovin joustavuuden vuoksi mittapäät johtoineen oli helppo työntää aukosta läpi säilyttäen kuitenkin mahdollisimman tiiviin lopputuloksen. Muovi liimattiin sääkaapin kylkeen ja ruuvattiin varmuuden vuoksi vielä kulmista kiinni.

Sääkaapin sijainti oli sellaisessa paikassa toimeksiantajayritystä, jonne se kokonaisuudessaan mahtui, eikä sitä voinut juurikaan liikuttaa. Testattavat LEDit, tietokonetarvikkeet ja mittausvälineet oli siis tuotava sen luokse. Tietokoneen keskusyksikköä voidaan testauksien aikana pitää maassa, mutta näyttöä ja näppäimistöä varten rakennettiin sopivan kokoinen taso kaapin vasempaan kylkeen. Tämä tuo lisähelpotusta työntekijöille, joiden ei vastaisuudessaakaan tarvitse etsiä näppäimistöä tai näyttöä maatasolta.

#### 6.4.3 DLSG-401-kompressor

Tässä työssä käytetyn sääkaapin kylmäjärjestelmästä vastaa puolihermeettinen mäntäkompressor, jonka malli on DLSG-401. Kuten kuvassa 11 on esitetty, mäntäkompressorin toiminta perustuu männän edestakaiseen liikkeeseen sen sylinterien sisällä. Männän toiminnan seurauksena jäähdyttävä elementti joutuu ensin imuun sylinteriin, jossa sitä puristetaan. Jos sylintereitä on useampia,, kulkee se myös niiden kautta puristuen vielä lisää, jonka jälkeen se päätyy painesäiliöön.



Kuva 11. Mäntäkompressorin toimintaperiaate. [16]

Puolihermeettinen kompressoreroaa hermeettisestä sillä tavalla, että vikatilanteen sattuessa sen voi vielä avata ja tarpeen tullen huoltaa. Hermeettiset systeemit ovat täysin suljettuja, eikä niiden mekaanisia osia tai moottoria voi enää korjata, jos ne jostain syystä lakkaavat toimimasta. Hermeettiset ja puolihermeettiset kompressorivaihtoehdot ovat hyviä valintoja, jos halutaan estää vuotoja. [16]

DLSG-401 on kahdella sylinterillä varustettu puolihermeettinen mäntäkompressor, joka toimii 3-vaihesähköllä, jännitealueella 380 – 420 V. Sääkaappi käyttää kokonaisuudessaan noin 16 A virtaa, josta suurin osa, maksimissaan 8,6 A, menee kompressorin käyttöön. Sääkaapin ja sen osien tutkintavaiheessa huomattiin lisäksi laitteen voimavirtajohdon menneen rikki eikä laite suostunut käynnistymään. Ongelma ratkaistiin vaihtamalla vanha 5-napainen voimavirtajohto uuteen. Testivaiheessa todettiin myös kompressorin melutason olevan liian korkea, jotta sitä olisi voinut käyttää esimerkiksi tuotannon puolella, missä se olisi häirinnyt työntekijöitä. Sääkaappi päätettiin tästä syystä jo alkuvaiheessa sijoittaa sellaiseen paikkaan rakennusta, jonka välittömässä läheisyydessä olisi mahdollisimman vähän työntekijöitä. [17]

#### 6.4.4 Sääkaapin ohjelmointi

Lämpötestattessa ulkoilmavalaisimia, on hyvä pitää mielessä, että luonnossa lämpötilat vaihtelevat. Lisäksi valaisimia suunnitellaan käytettäväksi joskus melko lämpimiin olosuhteisiin, joten lämpötestaukset on tehtävä näitä asioita huomioiden. Sääkaappia hankittaessa olisi hyvä varmistaa, että siinä on ohjelmointimahdollisuus olemassa. Kuvassa 12 nähdään tässä työssä käytetyn sääkaapin JUMO-merkinen ohjelmointipaneeli.





Kuva 12. Sääkaapin LED-näyttöinen ohjelmointipaneeli.

Tämän sääkaapin ja kaikkien muidenkin sääkaappien tärkeimpänä yksittäisenä asiana voidaan pitää sitä osaa kaapista, joka mahdollistaa kaikki sen toiminnot. Siitä voidaan käyttää nimitystä keskusyksikkö, ja tässä työssä käytetyn sääkaapin keskusyksikkö koostuu muun muassa mikroprosessorista sekä muistipiireistä, kuten EPROM ja CMOS-RAM. Sen jälkeen kun LED-näyttöisen ohjelmointipaneelin säätimien käyttöön oli perehdytty, oli mahdollista tutustua laitteen tekniikan tarjoamiin toiminto- ja ohjelmointivaihtoehtoihin.

Ohjelmointipaneelin säätimien avulla käyttäjä voi valita jonkun olemassa olevista ohjelmista tai vaihtoehtoisesti ohjelmoida alusta alkaen itse työhönsä sopivan lämpötestausohjelman, jonka voi tallentaa ja tarvittaessa käyttää myöhemmin uudestaan. Ohjelmoinnin ei tarvitse rajoittua pelkästään sääkaapin lineaariseen toimintaan, kuten tasaiseen lämmittämiseen, vaan erilaisilla paneelin säätötoiminnoilla voidaan vaikuttaa myös tuulettimiin, kompressoriin ja kosteusyksikköön lisäten ohjelmiin monipuolisuutta. Lisäksi ajastinta käyttämällä voidaan määrittää esimerkiksi kuinka kauan yksittäinen testi kestää tai vastaavasti kuinka kauan halutaan pysyä tietyssä lämpötilassa, jonka jälkeen lämpötila muuttuu haluttuun suuntaan. Ohjelmointipaneelin kaikkia ominaisuuksia hyödyntämällä on siis mahdollista ohjelmoida monipuolinen

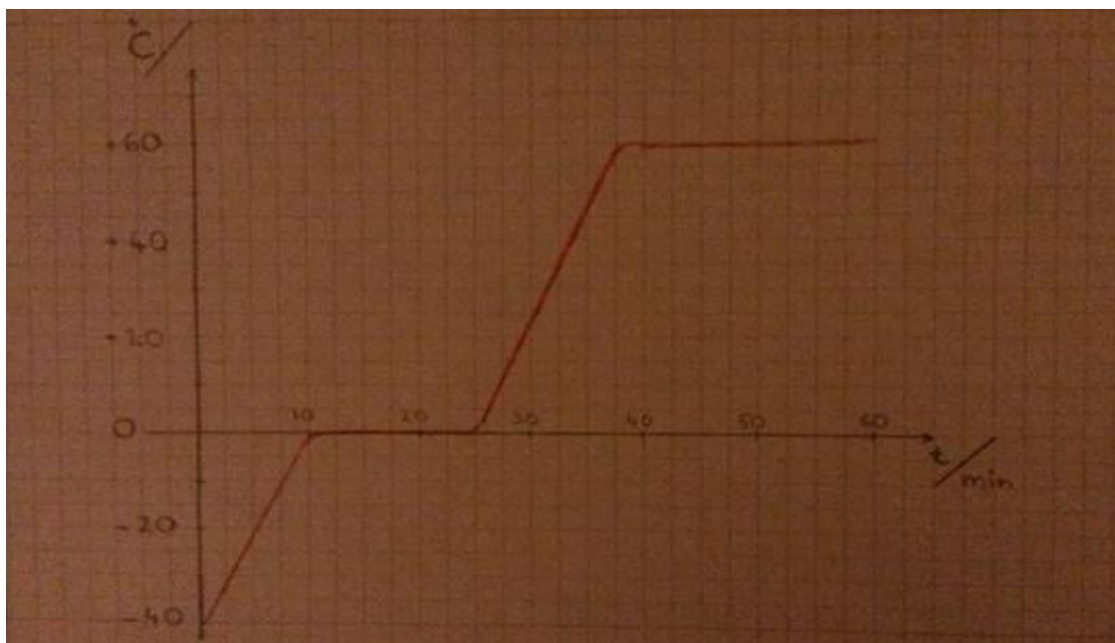
testausohjelma, joka vastaa mahdollisimman tarkasti niitä tilanteita, joihin myyntivalmis tuote todennäköisesti joutuu. [18]

#### 6.4.5 Esimerkkiohjelma

Eri valmistajien sääkaapit voivat olla toiminnoiltaan hieman erilaisia ja tämä koskee myös niiden ohjelmointia. Käyttöohjeisiin tutustuminen on paras tapa opetella mitä toimintoja omasta sääkaapista löytyy ja kuinka niitä voidaan ohjelmia tehdessä hyödyntää. Lämpötestausohjelmaa ei kannata kuitenkaan tehdä ennen kuin on selvillä testattavien tuotteiden käyttöolosuhteista ja muista vaatimuksista.

Sääkaappien ohjelmointi mahdollistaa tuotteen testauksen eri lämpötiloissa lyhyessäkin ajassa. Kuvassa 13 esimerkkiohjelman graafinen esitys. Esimerkkiohjelman ideana on altistaa tuote ensin -40 °C:n kylmyydelle, jonka jälkeen lämpötilaa nostetaan tasaisesti 0°C:seen 15 min:ksi. Tämän jälkeen sääkaappi on ohjelmoitu lämmittämään reilussa kahdessakymmenessä minuutissa 60 °C:seen saakka. Esimerkkiohjelma voisi lämpötilojensa puolesta sopia LED-tuotteiden testausohjelmaksi, joiden on tarkoitus toimia pohjoismaisissa sääolosuhteissa. Jos tuote läpäisee tämän lämpötestin niin sitä voidaan periaatteessa markkinoida pohjoismaisissa sääolosuhteissa kuten Suomessa, sillä Suomessa korkein koskaan mitattu lämpötila jää alle 40 °C. Testeissä tulisi lämpötilojen lisäksi huomioida tietysti myös kosteus. [19]

Esimerkkiohjelman käyrässä ei ole kyse testattavan tuotteen testipisteen lämpötilasta, vaan nimenomaan itse ohjelmasta ja sen eri vaiheista. Tuote käy myöhemmin valmistajan suunnitteleman ohjelman mukaisen lämpötilatestin läpi ja vasta silloin analysoidaan kuinka se on reagoinut ohjelman eri vaiheisiin.



Kuva 13. Paperille suunniteltu graafinen esitys esimerkkiohjelman vaiheista.

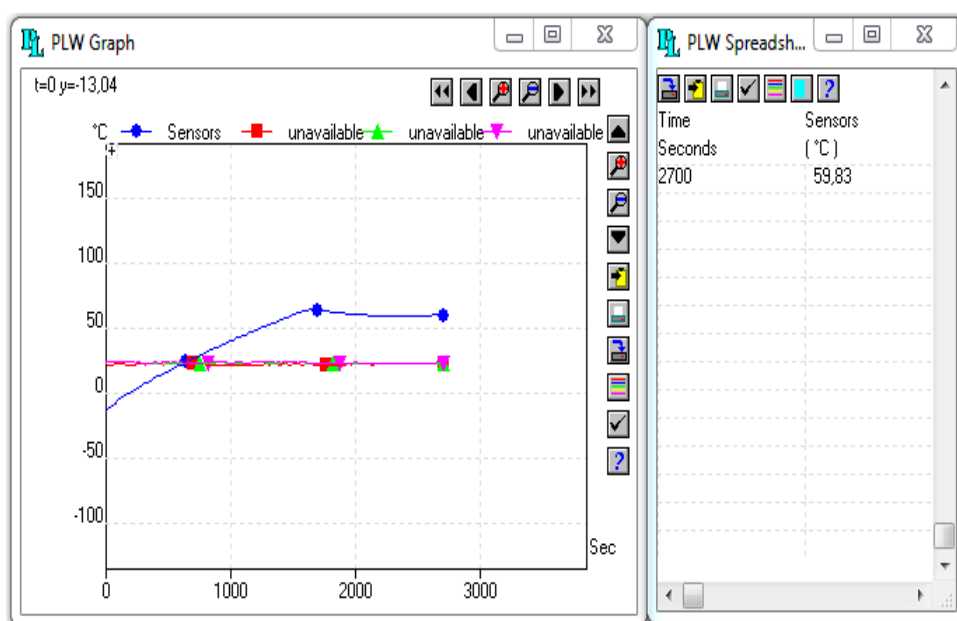
Kaikkien ohjelmien ei tarvitse olla nousujohteisia, kuten tässä kappaleessa esitetty esimerkkiohjelma on. Käyttäjä voi itse valita aloitus- ja lopetuslämpötilan ohjelmalleen, ja niiden välissä voidaan käydä tarpeen mukaan pakkasen ja lämpimän puolella useammankin kerran. Oleellista olisi kuitenkin, että LED-tuote testattaisiin niissä lämpötiloissa ja olosuhteissa, joihin se joutuu ollessaan käytössä ja hieman sitäkin haastavammissa lämpötiloissa. Nimittäin LED-valmistajan lupaama lämpötila, jossa tuote toimii vielä normaalisti, ei ole sen sietokyvyn ääripää, mutta siitä eteenpäin vikaantumisen riski alkaa kasvamaan selvästi. Lämpötestausohjelmia tehdäänkin siltä pohjalta, että saadaan lisätietoja joiden perusteella voidaan taata tuotteen luotettavuus, turvallisuus ja käyttöikä. [18, 20]

### 6.5 Sääkaapin validointi TC-08 dataloggerilla

Ennen ensimmäisen virallisen lämpötestin aloittamista on suositeltavaa, että myös kaikki laitteisto testataan. Sääkaapissa saattaa mennä virta päälle ja kaikki voi olla näennäisesti kunnossa. Mutta voi olla vaikea tietää esimerkiksi

lämmittääkö se siihen lämpötilaan saakka mihin se on ohjelmoitu vai loppuuko lämmittäminen hieman ennen tavoitetta. Dataloggerissa tai sen mittapäissä voi myös olla ongelmia, joihin ei välttämättä olla varauduttu. Vastaavanlaiset ongelmat on havaittavissa vain kalibroimalla ja testaamalla laitteet ennen varsinaisia tuotetestauksia.

Tässä työssä käytössä ollut sääkaappi oli varustettu yhdellä omalla sensorilla ja sen sijainti oli yläosassa kaappia, suurinpiirtein tuulettimien tasolla. Laitteen tarkistusvaiheessa todettiin, että kosteusyksikkö on epäkunnossa, mutta muuten virta kulkee ja lämpövastukset toimivat. Ohjelmointiin oltiin hieman tutustuttu, mutta sen toimivuudesta ei ollut vielä varmuutta. Validointi aloitettiin kuvan 14 mukaisesta tilanteesta, eli sääkaappi viilentyi ensin -13 °C:seen, jonka jälkeen sen oli tarkoitus lämmittää tasaisesti 60 °C:seen. Testi kesti 45 min.



Kuva 14. Testin tulos graafisena kuvana.

Dataloggerin yksi mittapää, joka vastaa graafisessa kuvassa sinistä viivaa oli kiinnitetty sääkaapin sensoriin. Lämpölukemien analysointi alkoi, kun sääkaapin lämpötila oli laskenut -13 °C:seen ja loppui 45 min testin alkamisen jälkeen. Kuvan 14 muut viivat ovat myös dataloggerin mittapäitä, mutta ne eivät olleet tässä testissä käytössä lainkaan.

Graafisen kuvan sinistä käyrää analysoimalla voidaan todeta, että laitteistoon ja sen antamiin tuloksiin voidaan luottaa. Käyrä osoittaa selvästi, että lämpötila on laskenut ohjelmoidulle tasolle, jonka jälkeen se on alkanut tasaisesti lämpenemään. Samojen tietojen perusteella näyttäisi siltä, että lämmitys on jatkunut vielä hetken ylitettyään 60 °C:n rajan, jonka jälkeen se on alkanut jälleen viilentymään. Tämänkaltaisen pienen lämpötilojen heittelehtiminen oli normaalia. Laite toimi siten, että sähköllä toimiva lämpövastus lämmitti, kunnes lämpötila oli ylittänyt aloitusvaiheessa ohjelmoidun lämpötilarajan. Ylitettyään tämän rajan, aloitti kompressorin toimintansa pyrkien viilentämään lämpötilaa takaisin siihen, mihin se oli ohjelmoitu. Tämä lämpenemisen ja viilenemisen vuorottelu aiheuttaa kysyisen heilahtelun graafisessa kuvassa.

## 7 LÄMPÖTESTAUKSET JA TULOKSET

Työssä tehdyt lämpötestaukset suoritettiin niin, että tuotteet joiden käyttökohde tulisi olemaan sisätiloissa testattiin myös sisätiloissa, ja ne tuotteet jotka tulisivat altistumaan vaihtelevalle lämpötilalle testattiin sääkaapissa. Tässä luvussa analysoidaan tapauksia molemmista testiympäristöistä. Tuotteet olivat vasta testaus vaiheessa joten niistä ei käytetä tekstissä oikeita nimityksiä.

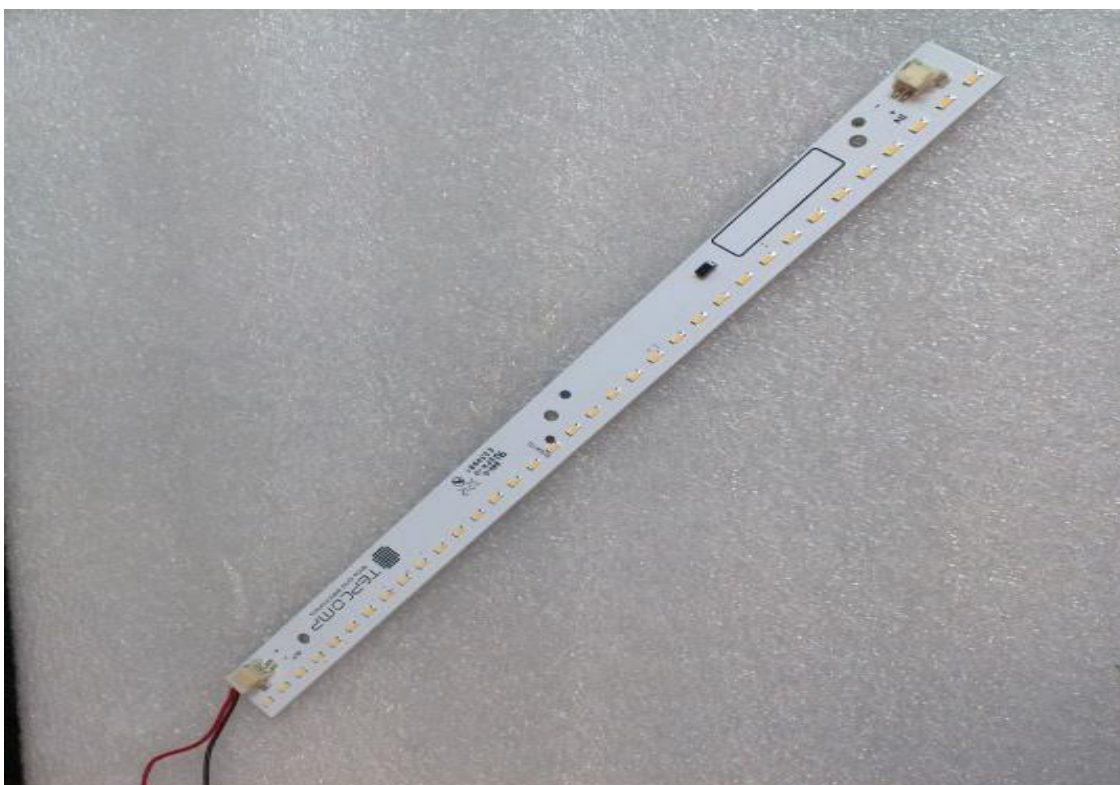
### 7.1 Testit huoneenlämmössä

LED-protot olivat ennen testiä käärittynä lämpöeristeeseen, koska niitä oltiin suunniteltu lämpötestattavaksi suljetussa tai lähes suljetussa tilassa. Ainoastaan piirilevyssä oleva kuparifolio, johon LED-komponentit olivat kiinnitetty, tulisi toimimaan niiden jäähdytyksenä. Lisäksi modulien piirilevymateriaali tulisi todennäköisesti myös vaikuttamaan jonkin verran jäähdytyksessä. Testituotteiden sisäänottama virta kaikissa tapauksissa oli 350 mA LEDien kynnysjännite noin 3 V. Tuotteet eivät olleet kuitenkaan muotoilultaan samanlaisia. Lämpötestausten aikana huoneessa oli lämpöä 22 °C ( $T_a$ ).

Tavoitteena oli selvittää toimisivatko protot lämpötestin aikana suljetussa tilassa sellaisenaan vai tarvitsisivatko ne vielä erillisen jäähdytyksen. Jos tuotteen lämpötestistä läpäisy on vain muutamasta asteesta kiinni, sille ei todennäköisesti mitään suuria muutoksia tulla tekemään. Syy tähän on se, että valmiit tuotteet tullaan kiinnittämään jokatapauksessa kotelointi vaiheessa lämpöä johtavaan metallilevyyn ja tämä tulee edistämään jäähdytystä huomattavasti.

### 7.1.1 LED35-prototyypin lämpötestaus

Huoneenlämmössä lämpötestattujen LED-prototyyppien joukossa esiintyi testin läpäisseitä tuotteita, mutta myös niitä, jotka eivät testistä selvinneet. Tässä luvussa esitetään esimerkkejä molemmista tapauksista. Kuvassa 15 on esitetty sisävalaistukseen suunniteltu LED35-prototyyppi.

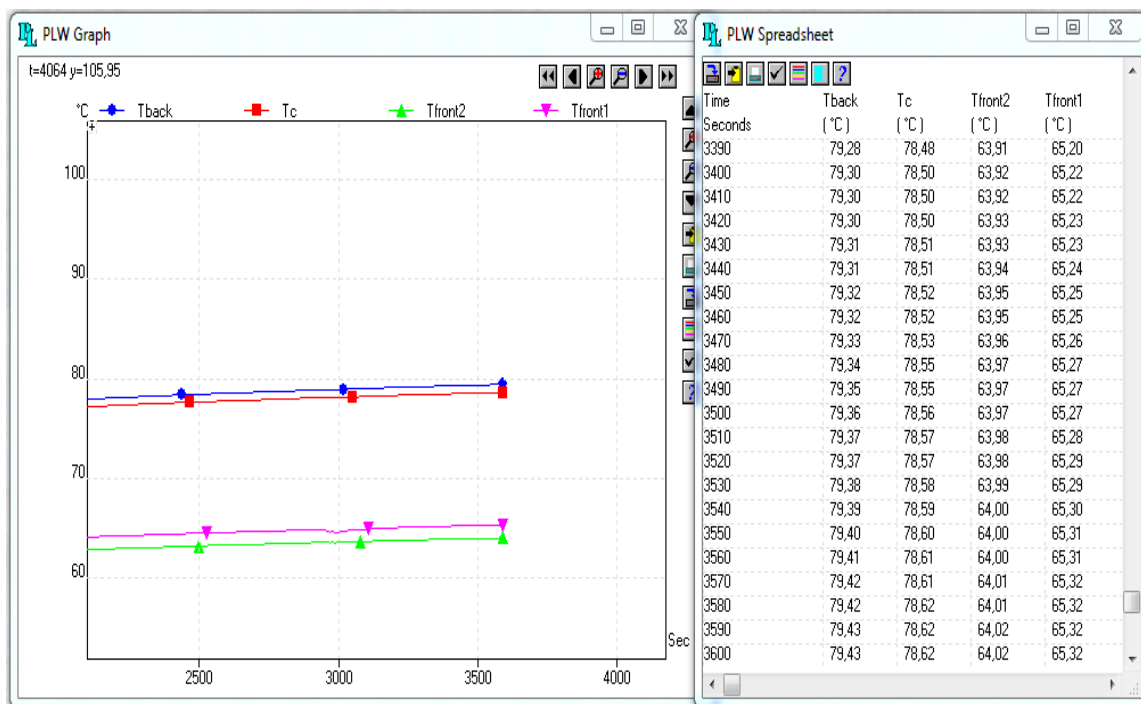


Kuva 15. Sisävalaistukseen suunniteltu LED35-prototikku.

Prototyyppi koostui 35 LED-komponentista, jotka on kiinnitetty piirilevyn (FR4). Testattavan tuotteen pinta-ala oli  $55 \text{ cm}^2$  ja kokonaistehonkulutus hieman yli 5 W. Tuote oli suunniteltu sisävalaistus tarkoitukseen. Dataloggerin mittapää oli kiinnitetty siten, että yksi mittapää ottaisi lukeamia LEDin juotoskohdasta ( $T_c$ ). Toinen mittapää ottaisi lukemia kääntöpuolelta ( $T_{back}$ ) ja kaksi jäljelle jäävää ottaisivat lämpölukemia päältä katsottuna molemmista päistä moduulia ( $T_{front1}$  ja  $T_{front2}$ ). Mittapäitä ei kannattanut kiinnittää moduuliin liimaamalla, koska niitä ei välttämättä olisi voinut saada enää irroitettua ilman

vahinkoja. Lämpöä johtava teippi osoittautui paremmaksi vaihtoehdoksi. Lopuksi moduuli piti vielä lämpöeristää, jotta tilanne olisi mahdollisimman lähellä tuotteen käyttöolosuhteita. Ainoastaan metallirunko puuttui, johon moduuli käyttövalmiissa muodossaan asennettaisiin.

Ensimmäinen lämpötesti osoittautui liian lyhyeksi, koska PC:n näytöllä reaaliaikainen lämpötilaseuranta kertoi kohteiden lämpötilojen edelleen kohoavan. Testiä ei kuitenkaan keskeytetty, koska tarkoitus oli ottaa selvää missä lämpötilassa tapahtuisi stabiloituminen. Ensimmäisestä testistä ei ole graafista kuvaa, mutta kuva 16 osoittaa, että testiä on jatkettu vielä tunnin verran ensimmäisen lämpötestin loputtua.



Kuva 16. LED35-prototikun lämpötestin lopputulos.

Tunnin kestävän jatkotestin näytteenotto aikaväleiksi oli asetettu 10 s. Lopputuloksia analysoimalla voidaan todeta, että tunnin aikana jokaisen testipisteen lämpötila oli kohonnut vain muutaman asteen verran, ja viimeisten minuuttien aikana enää vain tuhannesosia. On siis kohtuullista todeta testipisteiden lämpötilojen stabiloituneen.



Vertailemalla testipisteiden lämpötiloja keskenään voidaan huomata selvä ero niiden välillä. Juotoskohdan ja piirilevyn takaosan lämpötilat ovat käyneet selvästi korkeammilla lukemilla. Tämä johtuu siitä, kun LED-sirussa tuotettu lämpö kulkee rajapintojen lävitse piirilevyn takaosaan ja sieltä jäähdytyslementin avustamana ulos ympäristöön. [8]

Tulosten perusteella LED35:n  $T_c$ -pisteen lämpötila oli noussut korkeimmillaan noin 80 °C:seen saakka. Testiympäristön lämpötilan ja saadun tuloksen ero on näin ollen 58 °C, koska:

$$\Delta T = T_c - T_a = 80\text{ °C} - 22\text{ °C} = 58\text{ °C}$$

Toimeksiantajayrityksen edustajan mukaan heidän tuotteidensa  $T_c$ -pisteen arvot pyritään rajoittamaan 85 °C:seen. LED35:n testituloks on hyvin lähellä kyseistä lämpötilaa, mutta testaus oli suoritettu ympäristön ollessa 22 °C, joka ei kuitenkaan ole vakio huoneenlämpötila. Hyödyntämällä  $\Delta T$ :n arvoa, voidaan arvioida LED35:n maksimi käyttölämpötilaa ilman erillisen jäähdytyksen tarvetta. Tämä tapahtuu siten, että yrityksen asettamasta maksimi  $T_c$ :n arvosta vähennetään  $\Delta T$ :n arvo:

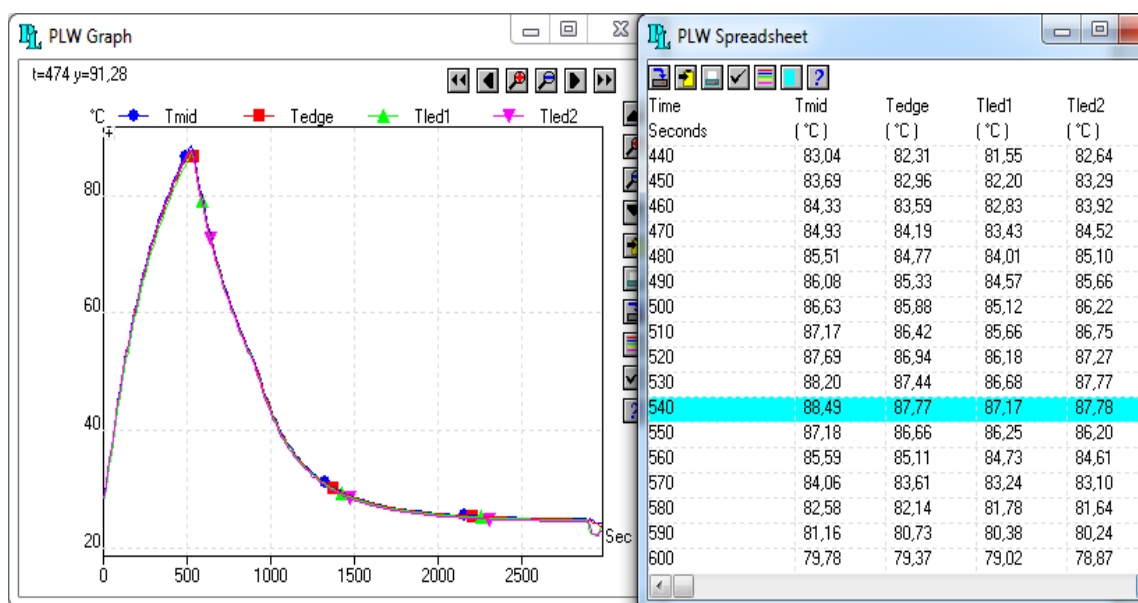
$$85\text{ °C} - \Delta T = 85\text{ °C} - 58\text{ °C} = 27\text{ °C}$$

Tuloksien perusteella voidaan sanoa LED35:n selviytyneen lämpötestistä, ja näin ollen pysyvän valmistajan antamien rajojen sisällä ilman erillistä jäähdytystäkin. Tulokset ovat kuitenkin hyvin lähellä rajoja ja se saattaa vaikuttaa tuotteen käyttöeliniikään.

#### 7.1.2 LED20-prototyypin lämpötestaus

Reilun 4 W tehoinen LED20-prototyyppi oli kahdeksankulmion muotoinen ja siinä oli 20 LED-komponenttia. Piirilevyn pinta-ala oli noin 25 cm<sup>2</sup> ja sen

materiaali alumiinia. Kaikki mittapääät olivat tässä testissä myös käytössä ja yksi niistä oli kiinnitetty kahdeksankulmion keskelle ( $T_{mid}$ ). Tämän testipisteen ympärillä olivat kaikki LED-sirut. Toinen mittapää oli kiinnitetty tuotteen reunalle ( $T_{edge}$ ) ja jäljelle jääneet kaksi mittapäää olivat kiinnitetty kahden eri LED-sirun juotoskohtaan ( $T_{led1}$  ja  $T_{led2}$ ). Tuote on sisävalaistukseen suunniteltu, joten se oli myös testin ajaksi lämpöeristetty. Kuvassa 17 lämpötestin lukemia LED20-prototyypille.



Kuva 17. LED20-prototyypin lämpötestin lopputulos.

Näytteenotto aikaväleiksi oli asetettu 10 s ja niitä oli tarkoitus ottaa vähintään 45 min ajan, mutta testi oli keskeytettävä jo alkumetreillä. Dataloggerin tallentamien lämpölukemien perusteella kaikkien testipisteiden lämpöarvot olivat nousseet ensimmäisen 10 min sisällä lähelle 90 °C, ja olisivat jatkaneet nousemista, jos testiä oltaisiin päätetty vielä jatkaa. Keskeytyksestä johtuen ei selvinnyt missä lämpötilassa tapahtuisi testipisteiden stabiloituminen, mutta varmaa oli se, että tuote ei tulisi toimimaan pitkään ilman erillistä lisäjäähdytystä.

Yksittäisen LEDin kuluttama teho oli LED20:ssa hieman tehokkaampi kuin LED35:ssä, mutta muuten ne eivät juurikaan sähköisesti eronneet toisistaan.

Lämpötestitulokset puolestaan olivat tuotteiden välillä hyvin erilaiset, sillä LED20 lämpeni huomattavasti enemmän ja nopeammin. Sen piirilevyn pinta-ala oli puolet pienempi ja tämä oli ehkä suurin syy testituloksien eroon. LED-siruja oli pinta-alaan nähden liian tiheään eikä tuotetulla lämmöllä ollut reittiä mitä kautta poistua systeemistä.

LED20-protossa olevan alumiinipiirilevyn yksi merkittäviä etuja on sen kyky johtaa tehokkaasti lämpöä, mutta se tarvitsee myös kohteen minne johtaa tuo lämpö. Jäähdytyssoili tai tilanteeseen sopiva metallirunko voisi olla hyvä kohde. Ilman erillistä jäähdytysalustaa lämpö jäisi ikään kuin loukkuun suljettuun tilaan. Käyttämällä alumiinipiirilevyä voidaan siis tinkiä piirilevyn mitoissa, mutta vain jos lämpö on johdettavissa erilliseen metallirunkoon ja sitä kautta ympäristöön. [21]

## 7.2 Vakiovirtalähdeprototyypin lämpötestaus sääkaapissa

Lämpötilan nousu aiheuttaa paljon huonoja sähköisiä muutoksia LEDeissä. Jos LEDin kautta kulkeva virta on liian pieni, seurauksena on heikko valoteho tai ei lainkaan valoa. Jos virta on taas liian suuri, saattaa se alkuun näkyä tavallista voimakkaampana valotehona lisäten samalla lämmöntuottoa, joka taas lyhentää käyttöikää tai aiheuttaa pysyvää vahinkoa. Pienetkin muutokset virrassa vaikuttavat LEDin toimintaan, luotettavuuteen ja valovoimaan. Vakiovirtalähteellä pyritään estämään lämpötilojen aiheuttamat muutokset LEDeissä ja saamaan aikaiseksi tasaisen valon. Sen tehtävänä on pitää LEDiin menevä virta vakiona. [22]

Sääkaapissa lämpötestattavana tuotteena oli kuvassa 18 esitetty vakiovirtalähde, joka toimii 24 – 48 V:n vaihtojännitealueella. Kuormaksi sille oli laitettu 700 mA:n tasavirralla ajettava LED-valaisin, jonka jännite oli 34 V. LED-kuormaa ei sääkaapissa pidetty, koska se ei ollut testattavana tuotteena. Vakiovirtalähteeseen menevän virran määräksi oli mitattu ennen testiä 1,15 A ja jännitteeksi oli asetettu kiinteästi 24,0 VAC. Testin avulla oli tarkoitus selvittää

miten aktiivitilassa oleva kuormitettu vakiovirtalähde tulisi toimimaan korkeammissa lämpötiloissa, pysyisikö ehjänä ja toimisiko odotetusti. Mainittakoon vielä, että testissä olevan kuorman jännite oli vakiovirtalähteen sietokyvyn rajoilla.

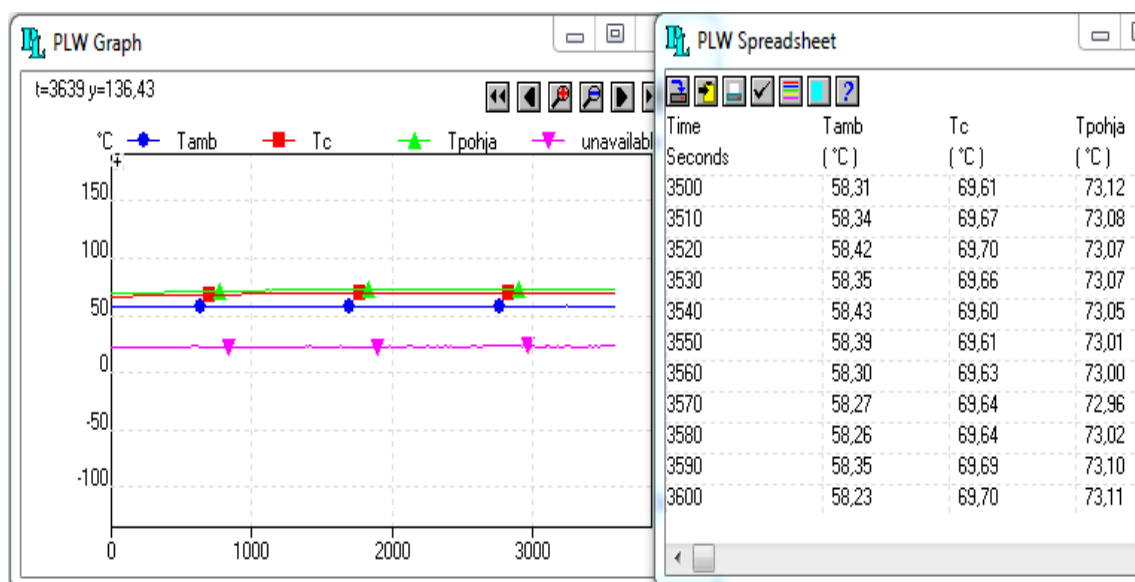


Kuva 18. Vakiovirtalähde prototyyppi.

Oletuksena oli, että virtalähteen rakenteissa syntyvä lämpöenergia siirtyy pohjalle ennen kuin se haihtuu lopulta ympäristöön. Mittapää oli asennettu tämän oletuksen pohjalta niin, että yksi otti lukemia virtalähteen kotelosta ( $T_c$ ) ja toinen pohjasta ( $T_{pohja}$ ). Kotelosta lämpölukemia ottava mittapää oli asennettu siten, että virtalähteen massakerrokseen oli tehty pieni reikä ja mittapää työnnetty siitä sisälle, jossa se oli kosketuksissa teho-FET:in jäähdyttimen kanssa. Vaikka sääkaappi on todettu toimivaksi, kiinnitettiin kolmas mittapää sääkaapin sisälle noin 10 cm:n päähän virtalähdettä. Sen tarkoitus oli ottaa tarkkoja lämpötila-arvoja testilaitteen ympäristöstä ( $T_{amb}$ ).

Sääkaapin maksimilämpötilaksi oli ohjelmoitu  $60^{\circ}\text{C}$  ja dataloggerin asetukset siten, että aluksi lämpötilalukemia tallentui sen tietokantaan tunnin ajan joka 10 s välein. Testiä jouduttiin kuitenkin vielä jatkamaan toisella tunnilla, koska laite ei ehtinyt olemaan ensimmäisen tunnin aikana kovinkaan pitkään  $60^{\circ}\text{C}$ :n

ympäristölämpötilan rasituksessa. Kuva 19 tarkastelemalla selviää, että siinä oleva informaatio on peräisin jälkimmäisestä tunnista, koska lämpötestiä ei aloitettu noin lämpimistä olosuhteista, vaan testin aloituslämpötila oli  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 19. Vakiovirtalähteen lämpötestin lopputulos.

Sääkaappi lämpeni ohjelmoituun maksimilämpötilaan vajaassa puolessa tunnissa, joka dataloggerin  $T_{\text{amb}}$ -testipisteen mukaan oli korkeimmillaan noin  $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Virtalähteen testipisteet stabiloituivat molemmat vasta reilun tunnin kuluttua testin aloittamisesta. Lämpötestauksen korkeimman lämpötilan saavutti odotusten mukaisesti  $T_{\text{pohja}}$ . Tämä viittaa siihen, että lämmönhallinta virtalähteen sisällä oli toiminut odotetusti ja lämpö siirtyi laitteen rakenteista pohjametalliin. Lisäksi testin aikana mittareita oli pidetty silmällä ja todettu virtojen pysyneen vakiona koko lämpötestin aikana. Vakiovirtalähteeseen tuli sisään koko ajan  $1,15\text{ A}$  ja kuormaan meni  $700\text{ mA}$ . Sähköisten arvojen vakiona pysyminen tarkoitti myös tehohyötysuhteen pysyneen myös vakiona. Laskujen mukaan  $27,6\text{ W}$ :n kokonaistehosta  $3,8\text{ W}$  jäi virtalähteeseen tuottamaan häviölämpöä. Prosenteissa tämä tarkoitti noin  $86\%$ :n tehohyötysuhdetta. Tämä koskee kuitenkin vain vakiovirtalähdettä, koska kuormana ollut valaisin ei kaikkea tehoaan valoksi muuttanut, vaan se tuotti myös häviölämpöä, joka ei ollut mitattavana. Tulokset vaikuttivat hyvältä ja niiden perusteella oli turvallista sanoa vakiovirtalähteen läpäiseen testin, mutta vain lämmön osalta. Saatuihin

tuloksiin ei olisi järkevää luottaa sokeasti, koska lämpö on vain yksi osa kokonaisuutta. Todellisuudessa laitteet joutuvat useamman eri rasituksen alaiseksi, joskus jopa samanaikaisesti ja pidemmäksi aikaa. Lisäksi kyseisten laitteiden, jotka sisältävät hakkuripiirejä, täytyy noudattaa EMC-standardeja.

## 8 PÄÄTELMÄT

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa toimeksiantajayritykselle lämpömittaus- ja simulointijärjestelmä, jonka avulla voidaan suorittaa LED-valaisinprototyyppien sekä muiden elektroniikkatuotteiden lämpömittauksia. Tuotteita oli sisä- ja ulkokäyttöön, ja niille oli tarkoitus kehittää mahdollisimman haastava testiympäristö. Ulkokäyttöön tarkoitettujen tuotteiden testaamista varten päädyimme kunnostamaan vanha sääkaappi, mutta kaapissa voisi tehdä lämpörasitustestejä muillekin tuotteille. Testin avulla yritys saisi arvokasta lisätietoa tuotteidensa lämmönhallinnasta ja niitä olisi mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa tuotekehityksen parissa.

Toimeksiantajayrityksen tarkoituksiin sopiva mittausjärjestelmä löytyi hyvissä ajoin, ja sen asennus sekä käyttöönotto onnistui ilman suurempia ongelmia. Laite oli pieni, helppokäyttöinen ja USB-yhteensopiva, minkä ansiosta onnistui reaaliaikainen mittaustulosten seuranta. Eniten ongelmia koettiin sääkaapin käyttöönotossa. Sitä kunnostettaessa kävi ilmi, että kaapin kosteusyksikkö ei toimi lainkaan. Etsinnöistä huolimatta vikaa ei paikannettu, eikä mahdollisuutta ollut uuden hankkimiselle. Tämä tarkoitti sitä, että prototyyppejä ei ollut mahdollista testata lisäämällä kosteutta niin kuin alun perin oli suunniteltu. Ongelmia aiheutui myös ohjelmoinnissa. Pelkkä yksisuuntainen lämmitys tai jäähdytys ei tuottanut ongelmia, mutta mitään monimutkaisempaa kaappi ei ilman soveltamista tehnyt. Ongelma havaittiin, kun sääkaapin lämpötila oli ohjelmoitu ensin laskemaan pakkasen puolelle, jonka jälkeen sen oli tarkoitus lämmittää tasaisesti haluttuun lämpötilaan. Lämmitysvaiheessa se ei kuitenkaan ylittänyt 18 °C:n rajaa. Ongelma oli ratkaistava kytkemällä jäähdyttävä elementti eli kompressorin pois päältä ja kytkettävä takaisin päälle, kun kyseinen lämpötila oli ylitetty. Sääkaapin suhteen ei siis päästy toivottuun lopputulokseen, mutta lämpötestejä sillä edelleen pystyi suorittamaan.

Muutamille protomalleille suoritettiin lämpötesti huoneenlämmössä, joka oli tuolloin 22 °C ja vain yhtä tuotetta testattiin sääkaapissa korkeammissa

lämpötiloissa. Huoneenlämmössä testattujen LED-valaisinten kokonaistehonkulutukset eivät poikenneet toisistaan niin kovin paljon (4 – 8 W), mutta LED-sirujen määrässä, piirilevyn pinta-alassa ja materiaalissa oli enemmän eroavaisuuksia. Suuremman piirilevypinta-alan omaavien valaisinten kriittisten kohtien lämpötilat pysyivät paremmin halutuissa lämpötiloissa kuin niiden, joissa oli useampia LED-siruja ahdettu pienempään tilaan. Erään testituotteen piirilevymateriaalina oli alumiinia, ja alumiinin tiedetään johtavan tehokkaasti lämpöä, mutta kyseisen tuotteen lämmönhallinta oli huomattavasti heikompi verrattuna marginaalisesti pienitehoisemman, mutta heikommin lämpöä johtavan piirilevymateriaalin omaavaan protovalaisimeen. Syy tähän oli sen puolet pienempi piirilevyn pinta-ala. Alumiini johti tehokkaasti lämpöä lähteestä poispäin, mutta lämpö jäi silti loukkuun pieneen ja suljettuun tilaan. Huoneenlämmössä tehtyjen testien joukossa vain muutama selvisi lämpötestistä, mutta nekin pysyivät vain juuri ja juuri alle raja-arvon. Sääkaapissa testattu vakiovirtalähde sen sijaan selviytyi testistä lämpötilojen osalta melko hyvin. Laite ei ylikuumentunut eikä hajonnut testin aikana, ja sen todettiin ottavan sisään koko ajan 1,15 A ja päästävän ulos 700 mA:n virtaa. Vakiovirtalähteen tehohyötysuhdekin pysyi siis koko ajan saman suuruisena.

Yksikään LED-proto ei läpäissyt lämpötestiä hyvällä arvosanalla. Muutaman kohdalla testi oli keskeytettävä, koska lämpötilarajat ylittyivät selvästi ja osa läpäisi testin niukasti. Testit suoritettiin lämpötilan ollessa 22 °C, joka ei ole vakiohuoneenlämpötila. Jos valaisin sijoitetaan huoneeseen, vaikkapa lähelle lämpöpatteria, siellä voikin olla huomattavasti lämpimämpää kuin testihuoneen 22 °C. Lämpötestit olivat myös melko lyhyitä ja tästä syystä lähinnä suuntaa antavia. Näinkin lyhyillä testeillä varmistettiin kuitenkin, että LED-moduulit todellakin tarvitsevat jäähdytystä, sillä ilman sitä ne käyvät koko ajan melko kuumina. Jos sääkaappiin saisi kosteusyksikön, tulevaisuudessa yritys pystyisi testaamaan protoja entistä realistisemmassa ja haastavammassa ympäristössä. Oma sääkaappi mahdollistaa myös pitkäaikaisia lämpö- ja rasiustestejä yritykselle juuri silloin kuin yrityksellä on sille tarvetta.



## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä rakennettiin toimeksiantajayritykselle toimiva lämpömittausjärjestelmä, mutta ihan täysin toivomuksien mukainen siitä ei tullut. Ongelmia esiintyi esimerkiksi sääkaapin kosteusyksikön suhteen, joka oli poistettava systeemistä kokonaan. Sääkaappi pystyi kuitenkin lämpötilojen osalta antamaan testattaville tuotteille haasteellisen testiympäristön. TC-08 dataloggerin avulla järjestelmään saatiin lisäksi vaatimusten mukainen USB-yhteys tietokoneeseen. Dataloggerin ohjelmistoon sisältyi reaaliaikainen graafinen esitys, jonka ansiosta oli helppo seurata lämpötestien etenemistä. Opinnäytetyön aikana lämpötestaus suoritettiin sääkaapissa vain yhdelle vakiovirtalähdeprototyypille. Lisäksi muutamille LED-valaisinprototyypille suoritettiin lämpötestaus huoneenlämmössä.

Lämpötestit osoittivat, että LED-valaisimet eivät tulisi toimimaan tarkoituksenmukaisesti ilman lisäjäähdystä. Tätä osattiin alusta alkaen odottaa, mutta LED-protojen lämpötestaukset antoivat kuitenkin arvokasta tietoa, joka auttaa tuotekehityksessä kyseisten tuotteiden jäähdystarpeiden profiloimisessa. Sääkaapissa testattiin vain vakiovirtalähde, joka läpäisi testin, mutta omalla lämpömittausjärjestelmällä yritys voi jatkossa tehdä lämpötestejä silloin kuin siihen on tarvetta.

Tässä työssä rakennettua lämpömittausjärjestelmää voisi kehittää lisäämällä sääkaappiin muita tehosteita, kuten kosteutta tai tärinää lisäävää tekniikkaa. Sääkaappi on kuitenkin jo sen verran vanha, että saattaisi tulla taloudellisemmaksi päivittää kokonaan uuteen laitteeseen.

## LÄHTEET

- [1] Wikipedia, "LED", [www-dokumentti]. Saatavissa <http://fi.wikipedia.org/wiki/LED> (Luettu: 11.10.2014)
- [2] Tölö, Olli. "LED-valaisimen hyödyntäminen sisävalaistuksessa". Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. 2013.
- [3] Ensto Pro koulutusmateriaali, "LED", [www-dokumentti]. Saatavissa <http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1228387313247/1228387387439/1233229692599/1233229715150.html> (Luettu: 15.10.2014)
- [4] Wikipedia, "Thermal Management of High-Power LED's", [www-dokumentti]. Saatavissa [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_management\\_of\\_high-power\\_LEDs](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_management_of_high-power_LEDs) (Luettu: 15.10.2014)
- [5] Wikipedia, "LED-komponentti kuva", [www-dokumentti]. Saatavissa [http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_management\\_of\\_high-power\\_LEDs#mediaviewer/File:LED\\_package.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_management_of_high-power_LEDs#mediaviewer/File:LED_package.jpg)
- [6] Cariitti, "LED-tietopaketti", [www-dokumentti]. Saatavissa <http://www.cariitti.fi/sivut/led-tietopaketti> (Luettu: 4.3.2014)
- [7] Jahkonen, Jaana. "LED-valaisimen jäähdytys". Diplomityö. Elektroniikan laitos / Valaistusyksikkö. 2009.
- [8] Solais Lighting, "Active Cooling", [pdf-dokumentti]. Saatavissa <http://www.solais.com/download.php?f=/var/chroot/home/content/19/10197719/html/uploadedFiles/download/pdf/ActiveCoolingWhitePaper.pdf>
- [9] Onsetcomp, "What is datalogger", [www-dokumentti]. Saatavissa <http://www.onsetcomp.com/what-is-a-data-logger> (Luettu: 4.4.2014)

[10] Cincinnati Sub-Zero, "Selecting an Environmental Test Chamber", [pdf-dokumentti]. Saatavissa

[http://www.cszindustrial.com/portals/1/pdf/testchamber\\_selection\\_low.pdf](http://www.cszindustrial.com/portals/1/pdf/testchamber_selection_low.pdf)

[11] Future Lighting Solutions, "LED-valaisimen suunnittelu", [pdf-dokumentti].

Saatavissa [http://www.valosto.com/tiedostot/LED\\_valaisimen\\_suunnittelu.pdf](http://www.valosto.com/tiedostot/LED_valaisimen_suunnittelu.pdf)

[12] Electronics Cooling, "Thermal Challenges in LED-cooling", [www-dokumentti]. Saatavissa <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>

(Luettu: 5.3.2014)

[13] Xicato, "Heatsink", [pdf-dokumentti]. Saatavissa

<http://www.xicato.com/sites/default/files/documents/Active%20Heatsink.pdf>

[14] Cree, "Solder-Point Temperature Measurement", [pdf-dokumentti].

Saatavissa

[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cree.com%2Fxlamp\\_app\\_notes%2Fsolder\\_point\\_temp&ei=VDbGVL-uB-fVygO8hoHIDw&usq=AFQjCNFn-g\\_meyNgHNZUe9WU4zZeQ-1zMg&sig2=ZpE2P7GfawJredpOuyxnCA&bvm=bv.84349003,d.bGQ](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cree.com%2Fxlamp_app_notes%2Fsolder_point_temp&ei=VDbGVL-uB-fVygO8hoHIDw&usq=AFQjCNFn-g_meyNgHNZUe9WU4zZeQ-1zMg&sig2=ZpE2P7GfawJredpOuyxnCA&bvm=bv.84349003,d.bGQ)

[15] Picotech, "TC-08", [pdf-dokumentti]. Saatavissa

<http://www.picotech.com/document/pdf/usbtc08.en-7.pdf>

[16] Berg-group, "Mäntäkompressorit", [www-dokumentti]. Saatavissa

[http://www.berg-group.com/refrigeration\\_systemcomponent.htm](http://www.berg-group.com/refrigeration_systemcomponent.htm) (Luettu: 7.12.2014)

[17] Elektronika-sa, "DL SG-401", [pdf-dokumentti]. Saatavissa

<http://www.elektronika-sa.com.pl/tcmodelpdf.php?MID=73860&RID=1>

[18] JUMO-Dicon PR, "Sääkaapin ohjauspaneelin käyttöopas", [pdf-dokumentti]. Saatavissa

[http://www.jumo.be/media/PDFs/Support\\_Download/product\\_archive/b95.630gb\\_DICON\\_PR\\_03.90.pdf](http://www.jumo.be/media/PDFs/Support_Download/product_archive/b95.630gb_DICON_PR_03.90.pdf)

[19] Wikipedia, "Suomen ilmasto", [www-dokumentti]. Saatavissa  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen\\_ilmasto](http://fi.wikipedia.org/wiki/Suomen_ilmasto) (Luettu: 31.12.2014)

[20] Espec, "What is environmental testing", [pdf-dokumentti]. Saatavissa  
[http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech\\_info/pdf/a1/e\\_3.pdf](http://www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/pdf/a1/e_3.pdf)

[21] Intelatech, "Aluminium PCB", [pdf-dokumentti]. Saatavissa  
<http://www.intelatech.com/Baknor-PCBs-ALUMINUM.pdf>

[22] Luxdrive, "What is a driver", [www-dokumentti]. Saatavissa  
<http://www.luxdrive.com/products/what-is-a-driver/> (Luettu: 14.1.2015)

